N° d'enregistrement
au C. N. R. S.

THESE DE DOCTEUR INGENIEUR

présentée

A L'UNIVERSITE PARIS VI

par

M. Czeslaw JODLOWSKI

pour obtenir

le titre de Docteur Ingénieur

Sujet de la Thèse :

Etude des vitesses minimales de transport de produits solides en vrac dans les conduites d'installations de manutention pneumatique. Application à l'écoulement turbulent diphasique dans un conduit vertical ascendant.

Soutenue le 20 juin 1975 devant la Commission d'Examen

MM. A. FORTIER Président

R. COMOLET

M. DOUCHEZ Examinateurs

N° d'enregistrement
au C. N. R. S.

THESE DE DOCTEUR INGENIEUR

présentée

A L'UNIVERSITE PARIS VI

par

M. Czeslaw JODLOWSKI

pour obtenir

le titre de Docteur Ingénieur

Sujet de la Thèse :

Etude des vitesses minimales de transport de produits solides en vrac dans les conduites d'installations de manutention pneumatique. Application à l'écoulement turbulent diphasique dans un conduit vertical ascendant.

Soutenue le 20 juin 1975 devant la Commission d'Examen

MM.	A. FORTIER	Président
	R. COMOLET	Examinateurs
	M. DOUCHEZ	

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

La présente étude a été effectuée sous la direction de Monsieur le Professeur A. FORTIER.

Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour l'aide et les conseils qu'il m'a prodigués tout au long de ce travail.

Cette recherche a été réalisée dans le cadre d'une Action Concertée avec l'aide de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique à qui j'adresse mes remerciements ainsi qu'à la Direction Générale des Etablissements NEU qui a permis par sa contribution d'entreprendre et de mener à terme ces travaux.

Je remercie également le personnel du Groupe de Recherches Transport Pneumatique des Etablissements NEU, qui a participé aux essais, et celui de la Section d'Applications de la Radioactivité du C E A de Saclay pour sa collaboration à la mise au point de certains dispositifs de mesure.

INTRODUCTION

Le transport pneumatique consiste à créer, dans un conduit étanche, un courant d'air ou de gaz, à mettre en suspension dans ce courant la matière à transporter et, en fin de parcours, à la séparer de l'air ayant servi à la véhiculer.

Pour cela il est nécessaire de maintenir dans la tuyauterie une vitesse suffisante pour éviter tout dépôt en cours de transport. Le calcul d'une installation consiste donc en une détermination du débit d'air, de la pression de fonctionnement et du diamètre du conduit en fonction du produit à véhiculer.

L'étude des vitesses minimales de transport, c'est à dire en-dessous desquelles l'installation ne peut fonctionner de façon stable, sans bouchage, est d'un intérêt capital car, plus la vitesse retenue est faible, plus la puissance installée et l'énergie consommée sont réduites et moins la dimension du matériel, et par suite son coût, sont importants.

La présente recherche porte sur l'étude des valeurs optimales de la vitesse de transport et de la concentration correspondant aux pertes de pression minimales d'un écoulement turbulent diphasique dans un conduit cylindrique vertical ascendant.

Les travaux ont été effectués pour des fortes concentrations massiques avec des produits granuleux et pulvérulents et sur des diamètres de conduit différents.

Nous présentons dans la première partie la théorie du Professeur A. FORTIER relative à l'écoulement turbulent stationnaire biphasique fluide-solide. Ce chapitre comporte les définitions fondamentales et l'établissement des équations générales se rapportant à ce type d'écoulement. La seconde partie est consacrée à l'application des équations générales à un courant vertical ascendant en régime établi. La troisième partie comprend la description de l'installation d'essais et des moyens de mesure. Dans la quatrième partie on a rassemblé l'étude expérimentale ; la cinquième partie étant consacrée à l'analyse des résultats et aux conclusions.

La sixième partie reprend les annexes dans lesquelles on a reporté un résumé de l'étude bibliographique, les références ainsi que les tableaux et schémas concernant les appareils de mesure et en particulier la description du matériel utilisé pour la détermination de la concentration spatiale moyenne dans une section droite du conduit.

TABLE DES MATIERES

- INTRODUCTION

- PREMIERE PARTIE 1
  1 - Rappels théoriques 2
    11 - Extrait de l'Etude de A. FORTIER relative à l'écoulement turbulent stationnaire biphasique air-solide dans un tube cylindrique à forte concentration massique.

- DEUXIEME PARTIE 10
  Notations 11
  2 - Application des équations générales, en régime établi, à un courant vertical ascendant 13

- TROISIEME PARTIE 18
  3 - Installation d'essais et dispositifs de mesure 19
    31 - Description de l'installation
    32 - Dispositifs de mesure 22
      321 - Détermination du débit-masse de particules
      322 - Détermination du débit-masse d'air
      323 - Pertes de charge 26
      324 - Mesure de la vitesse U_s des particules et détermination de la concentration spatiale moyenne c dans une section du conduit 29

- QUATRIEME PARTIE 36
  4 - Etude expérimentale 37
    41 - Essais avec les produits granuleux
      411 - Résultats obtenus avec les granulés de polyéthylène 42
      412 - Résultats obtenus avec le blé 52

    42 - Essais avec les produits pulvérulents 62
      421 - Résultats obtenus avec le sable
      422 - Résultats obtenus avec le PVC en poudre 73

- CINQUIEME PARTIE 80

5 - Analyse des résultats 81

51 - Produits granuleux

52 - Produits pulvérulents 87

53 - Conclusions 89

- SIXIEME PARTIE - ANNEXES 97

Annexe I - Analyse bibliographique et références bibliographiques 98

Annexe II - Dispositif de mesure de la concentration spatiale dans une section droite du conduit 101

Annexe III - Matériel d'essai 103

Annexe IV - Granulométrie des produits transportés 109

Annexe V - Tableau récapitulatif des valeurs maximales des rapports des débits en masse q_s/q_g obtenues au cours des essais 111

PREMIERE PARTIE

RAPPELS THEORIQUES

Ecoulement turbulent stationnaire biphasique fluide-solide dans un tube cylindrique.

1 - RAPPELS THEORIQUES

11 - EXTRAIT DE L'ETUDE DE A. FORTIER RELATIVE A L'ECOULEMENT TURBULENT STATIONNAIRE BIPHASIQUE AIR SOLIDE DANS UN TUBE CYLINDRIQUE A FORTE CONCENTRATION MASSIQUE.

Les écoulements que l'on observe dans le transport pneumatique de matériaux solides dans les conduits sont beaucoup trop complexes pour qu'on puisse traiter actuellement les problèmes correspondants par voie purement théorique.

Pourtant les transferts de chaleur et de masse étant le plus souvent complètement négligeables dans ces écoulements, on peut écrire les équations des mouvements des matériaux solides dispersés que nous appellerons particules et du fluide ainsi que les conditions initiales et les conditions aux frontières qui définissent un problème particulier donné. Malheureusement le nombre de variables est tellement important qu'on peut tout au plus, à partir des équations, faire apparaître les paramètres de similitude. Mais le nombre extrêmement élevé de variables donne fort heureusement à ces écoulements un caractère essentiellement aléatoire qui permet de les traiter en introduisant uniquement des grandeurs statistiques ayant un sens physique précis et en s'appuyant à la fois sur les équations générales et sur l'expérience.

Lorsque les particules ont des dimensions extrêmement petites par rapport au diamètre D du conduit, on définit (✳), un nombre de particules par unité de volume, une concentration en volume, des vitesses de particules, du fluide et de la suspension, grandeurs statistiques définies en tous les points de l'espace occupé par la suspension en mouvement et à l'instant t.

Ces grandeurs satisfont à des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement de même forme que les équations correspondantes du mouvement d'un milieu continu.

Mais lorsque les dimensions des particules ne sont plus négligeables devant D, il faut introduire à la place du nombre de particules par unité de volume la notion de taux de présence moyen, en un point M, du solide et du fluide.

(✳) A. FORTIER : Mécanique des Suspensions. Edition Masson Paris 1967

Si on réalise un nombre N extrêmement grand d'expériences identiques, c'est à dire pour lesquelles les conditions initiales, les conditions aux frontières, les particules et le fluide sont identiques et si on regarde un point M de position définie par rapport aux frontières et à un instant t donné (compté à partir de l'instant initial) on observe en M soit le solide soit le fluide. En posant $\alpha_s = 1$, $\alpha_f = 0$ si on observe le solide et $\alpha_f = 1$, $\alpha_s = 0$ si on observe le fluide, on appelle taux de présence moyen en M du solide le nombre $\overline{\alpha}_s = \frac{\Sigma \alpha_s}{N} = \frac{p}{N}$, p désignant le nombre de réalisations pour lesquelles on observe le solide en M et de même on appelle taux de présence moyen du fluide en M le nombre

$$\overline{\alpha}_f = \frac{\Sigma \alpha_f}{N} = \frac{1 - \overline{\alpha}_s}{N}$$

D'après ces définitions on a donc dans toutes les réalisations $\alpha_f = 1 - \alpha$ et en moyenne $\overline{\alpha}_f = 1 - \overline{\alpha}_s$. Si N est suffisamment grand $\overline{\alpha}_s$ ne dépend pas de N et on peut admettre que $\overline{\alpha}_s$ est une fonction continue et dérivable des coordonnées et du temps.

Lorsque $\alpha_s = 1$ en M dans une réalisation, il y a une particule solide qui contient le point M, le centre d'inertie de cette particule est animé d'une vitesse de projections U_{si} sur des axes de références Ox_i. On appelle vitesse moyenne des particules en M le vecteur de projections $\overline{U}_{si} = \frac{\Sigma \alpha_s U_{si}}{N \overline{\alpha}_s}$. On définit de même une vitesse moyenne du fluide en M de projections $\overline{U}_{fi} = \frac{\Sigma \alpha_f U_{fi}}{N \overline{\alpha}_f}$ et d'une façon plus générale on définit la moyenne $\overline{A}$ d'une quantité scalaire A pour la phase k (k=s ou f) en écrivant : $\overline{A} = \frac{\Sigma \alpha_k A}{N \overline{\alpha}_k}$

Si on considère un élément de volume infiniment petit dw de centre M on peut écrire $\overline{\alpha}_s = \frac{p\,dw}{N\,dw}$ et par conséquent $\overline{\alpha}_s$ représente le

volume moyen de solide par unité de volume total au point M. $\overline{\alpha_s}$ est donc la concentration moyenne $\overline{c}$ en volume du solide. Dans le cas de particules solides identiques très petites devant les dimensions d'un domaine $\mathcal{D}$ de l'espace, le nombre total moyen de particules dans $\mathcal{D}$ est $\iiint_{\mathcal{D}} \frac{\overline{\alpha_s}}{v} dw$, v désignant le volume d'une particule. En posant $\overline{n} = \frac{\overline{\alpha_s}}{v}$, $\overline{n}$ représente le nombre moyen de particules par unité de volume en M et on retrouve la relation $\overline{\alpha_s} = \overline{c} = \overline{n}\,\overline{v}$ introduite pour les très petites particules identiques. Dans le cas de grosses particules identiques il faut introduire le nombre de particules dont les centres d'inertie se trouvent dans $\mathcal{D}$. En moyenne ce nombre peut se mettre sous la forme $\iiint_{\mathcal{D}} \overline{n}.dw$ mais il n'est pas égal à $\iiint_{\mathcal{D}} \frac{\overline{\alpha_s}}{v}.dw$ car les particules qui sont au voisinage de la surface S, qui limite $\mathcal{D}$, coupent S et par conséquent le volume $\iiint_{\mathcal{D}} \overline{n}.v\,dw$ est supérieur au volume $\iiint_{\mathcal{D}} \overline{\alpha_s}.dw$.

En toute rigueur la relation entre $\overline{n}$ et $\overline{\alpha}_s$ dépend donc du rapport des dimensions des particules aux dimensions du volume $\mathcal{D}$ dans lequel on peut considérer que $\overline{\alpha}_s$ et $\overline{n}$ sont des constantes. Mais en pratique $\overline{n}$ et $\overline{\alpha}_s$ varient très lentement en fonction des coordonnées et on écrit habituellement $\overline{n}\,\overline{v} = \overline{\alpha_s}$.

Pour écrire des équations générales de conservation indépendantes de la taille des particules, il faut utiliser la notion de taux de présence et les moyennes qui en découlent. On désigne par α_k le taux de présence de la phase k (k = s ou f) et ρ_k la masse volumique.

12 - APPLICATION DES EQUATIONS DE CONSERVATION A L'ECOULEMENT STATIONNAIRE DANS UN CONDUIT CYLINDRIQUE.

Lorsque l'écoulement est stationnaire, les dérivées partielles par rapport au temps des diverses moyennes sont nulles et par conséquent seules

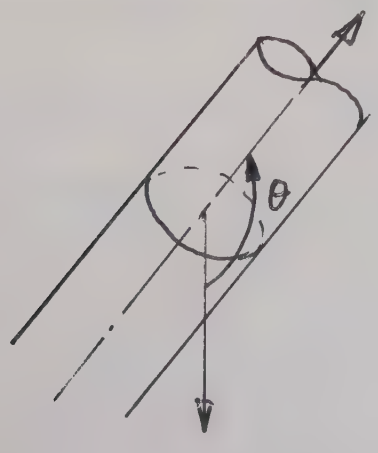
les intégrales de surface subsistent dans les équations de conservation. Dans le cas de l'écoulement dans un conduit cylindrique, on limite le volume $\mathcal{D}$ par deux sections droites S_1 et S_2 et la portion de paroi S_o du conduit comprise entre S_1 et S_2. En orientant les normales à S_1 et S_2 (parallèles aux génératrices du conduit) dans un sens positif choisi sur la direction des génératrices (le sens de l'écoulement moyen par exemple) les équations de conservation de la masse s'écrivent :

$$\iint_{S_2} \rho_s \bar{\alpha}_s \bar{u}_s \, d\sigma = \iint_{S_1} \rho_s \bar{\alpha}_s \bar{u}_s \, d\sigma = q_s$$

$$\iint_{S_2} \rho_f \bar{\alpha}_f \bar{u}_f \, d\sigma = \iint_{S_1} \rho_f \bar{\alpha}_f \bar{u}_f \, d\sigma = q_f$$

q_s et q_f désignent les débits masse moyens de solide et de fluide. u_s et u_f les projections des vitesses du solide et du fluide sur la direction orientée des génératrices, et $d\sigma$ un élément de surface de S.

Pour écrire les équations de conservation en moyenne de la quantité de mouvement en projection sur la direction des génératrices nous distinguerons : les forces extérieures qui s'exercent sur le solide et le fluide dans les sections S_1 et S_2 mises sous la forme $\iint_S \bar{\alpha}_k \bar{p} \, d\sigma$, p désignant une contrainte normale, les forces de frottement exercées par la paroi sur le solide et le fluide, que nous écrivons $\iint_{S_o} \bar{\alpha}_k \bar{f}_{tk} \, d\sigma$, les forces de pesanteur égales à $g \cos\theta \iiint_{\mathcal{D}} \rho_k \bar{\alpha}_k \, dw$ (θ désignant l'angle des génératrices orientées dans le sens de l'écoulement avec la verticale orientée de haut en bas et g l'accélération de la pesanteur), et enfin la somme $\bar{F}$ des projections des forces exercées en moyenne par le fluide sur le solide qui se trouve à l'intérieur de $\mathcal{D}$.



Avec ces notations les équations de conservation de la quantité de mouvement s'écrivent :

$$(1)\quad \iint_{S2} \overline{\alpha}_k \rho_k \overline{u_k^2}\, d\sigma - \iint_{S1} \overline{\alpha}_k \rho_k \overline{u_k^2}\, d\sigma = \pm \overline{F} + \iint_{S1} \overline{\alpha}_k \bar{p}\, d\sigma - \iint_{S2} \overline{\alpha}_k \bar{p}\, d\sigma + g \cos\theta \iiint_{\mathcal{D}} \rho_k \overline{\alpha}_k\, dw + \iint_{S0} \overline{\alpha}_k \overline{f}_{tk}\, d\sigma$$

On prend le signe + devant F si k = s et le signe = si k = f. Les moyennes étant par hypothèse des fonctions continues et dérivables de x, on peut écrire, en appliquant (1) à deux sections infiniment voisines d'abscisses x et x + Δ x :

$$(2)\quad \frac{d}{dx} \iint_S \overline{\alpha}_k \rho_k \overline{u_k^2}\, d\sigma = \pm \overline{f} - \iint_S \overline{\alpha}_k \frac{\overline{\partial p}}{\partial x}\, d\sigma + \rho_k g \cos\theta \iint_S \overline{\alpha}_k\, d\sigma + \int_C \overline{\alpha}_k \overline{f}_{tk}\, ds$$

C désignant le périmètre de S et $\overline{f}$ la moyenne de la somme des projections sur la direction des génératrices des forces exercées par le fluide sur les particules dans une unité de longueur du conduit.

Dans une même section la masse volumique du fluide, même s'il s'agit d'un gaz, peut toujours être considérée comme une constante car les variations de pression et de température sont toujours très faibles, dans une section, devant les valeurs moyennes correspondantes ; on peut donc dans tous les termes sortir la masse volumique ρ_k des moyennes.

Pour écrire les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement sous une forme utilisable pour les applications, nous introduirons la concentration spatiale moyenne du solide dans la section S c'est à dire $\frac{1}{S} \iint_S \overline{\alpha}_s\, d\sigma$, que nous désignerons par c et nous écrirons :

$$(3)\quad \iint_S \rho_s \bar{\alpha}_s \bar{u}_s \, d\sigma = c\, \mathcal{U}_s S \rho_s = q_s$$

$$(4)\quad \iint_S \rho_f \bar{\alpha}_f \bar{u}_f \, d\sigma = (1-c)\, \mathcal{U}_f S \rho_f = q_f$$

$$(5)\quad \iint_S \bar{\alpha}_s \rho_s \bar{u}_s^2 \, d\sigma = \beta_s c \rho_s \mathcal{U}_s^2 S$$

$$(6)\quad \iint_S \bar{\alpha}_f \rho_f \bar{u}_f^2 \, d\sigma = \beta_f (1-c) \rho_f \mathcal{U}_f^2 S$$

$$(7)\quad \iint_S \bar{\alpha}_s \frac{\overline{\partial p}}{\partial x} \, d\sigma = \beta_{ps} c \frac{d\bar{p}}{dx} S$$

$$(8)\quad \iint_S \bar{\alpha}_f \frac{\overline{\partial p}}{\partial x} \, d\sigma = \beta_{pf} (1-c) \frac{d\bar{p}}{dx} S$$

$$(9)\quad \iint_C \bar{\alpha}_s \bar{f}_{ts} \, dS = -c \frac{\Lambda_s}{4} \chi \rho_s \frac{\mathcal{U}_s^2}{2}$$

$$(10)\quad \iint_C \bar{\alpha}_f \bar{f}_{tf} \, dS = -(1-c) \frac{\Lambda_f}{4} \chi \rho_f \frac{\mathcal{U}_f^2}{2}$$

$$(11)\quad \bar{f} = S c C_D \rho_f \frac{(\mathcal{U}_f - \mathcal{U}_s)^2}{2} \cdot \frac{3}{2d}$$

Dans les relations (9) et (10) χ désigne le périmètre de la section S et d désigne dans la relation (11) un diamètre moyen des particules solides.

Les relations (3) à (11) sont en fait des relations de définition qui contiennent toutes la concentration spatiale moyenne c qui est une grandeur mesurable.

Les relations (3) et (4) définissent les vitesses débitantes $\mathcal{U}_s$ et $\mathcal{U}_f$, les relations (5) et (6) définissent des coefficients de quantité

de mouvement β_s et β_f ,les relations (7) et (8) des coefficients de répartition de pression, $\bar{p}$ désignant la pression moyenne mesurée en un point du périmètre de la section S, les relations (9) et (10) définissent des coefficients de frottement $\frac{\Lambda_s}{4}$ et $\frac{\Lambda_f}{4}$ pour le solide et pour le fluide et enfin la relation (11) définit un coefficient de traînée moyen C_D des particules.

En introduisant ces définitions dans les équations de conservation de la quantité de mouvement, mises sous la forme (2) nous obtenons, après avoir divisé les 2 membres par S, les deux équations suivantes :

$$(12)\quad \frac{d\beta_s c \rho_s U_s^2}{dx} = c C_D \rho_f \frac{(U_f - U_s)^2}{2} \frac{3}{2d} - \beta_{ps} c \frac{d\bar{p}}{dx} + \rho_s \cos\theta\, g\, c - c \frac{\Lambda_s}{D_H} \rho_s \frac{U_s^2}{2}$$

$$(13)\quad \frac{d\beta_f (1-c) \rho_f U_f^2}{dx} = -c C_D \rho_f \frac{(U_f - U_s)^2}{2} \frac{3}{2d} - \beta_{pf} (1-c) \frac{d\bar{p}}{dx} + \rho_f \cos\theta\, g (1-c) - (1-c) \frac{\Lambda_f}{D_H} \rho_f \frac{U_f^2}{2}$$

$D_H = \frac{4\,S}{X}$ est le diamètre hydraulique de la section, égal au diamètre D dans le cas de la section circulaire.

Pour des conduits de forme géométrique donnée, circulaire par exemple, de nature de paroi donnée, pour des particules de diamètre moyen d données et pour une structure donnée de l'écoulement à l'origine amont du conduit, les nombres sans dimension β_k, β_{pk}, Λ_k, C_D sont des fonctions d'un nombre de Reynolds $R_e = U_{fo} D / \nu_o$, d'un nombre de Froude $Fr_o = U_{fo} / \sqrt{gD}$ de ρ_s / ρ_{fo}, de d/D, de $\frac{x}{D}$ et de $\frac{q_s}{q_f}$ et de θ. L'indice o correspond à une section où la vitesse débitante, la masse volumique et la viscosité cinématique du fluide sont respectivement U_{f_o}, ρ_{fo} et ν_o. Mais dans beaucoup d'applications lorsque le nombre de Froude est suffisamment grand, β_p

et β_{pk} sont des nombres voisins de 1 et il est possible de traiter le problème en première approximation en faisant $\beta_k = \beta_{pk} = 1$ dans les équations (12) et (13).

Pour utiliser les équations (12) et (13) il est commode de les remplacer par les équations obtenues en les ajoutant membre à membre :

$$(14)\quad \frac{q_s}{S}\frac{dU_s}{dx} + \frac{q_f}{S}\frac{dU_f}{dx} = -\frac{d\bar{p}}{dx} + g\cos\theta\left[\rho_s c + \rho_f(1-c)\right] - c\frac{\Lambda_s}{D_H}\rho_s\frac{U_s^2}{2} - (1-c)\frac{\Lambda_f}{D_H}\rho_f\frac{U_f^2}{2}$$

et en les retranchant membre à membre après les avoir divisées respectivement par c et 1-c

$$(15)\quad \rho_s U_s\frac{dU_s}{dx} - \rho_f U_f\frac{dU_f}{dx} = C_D\rho_f\frac{(U_f-U_s)^2}{2}\frac{3}{2d}\frac{1}{1-c} + g\cos\theta(\rho_s-\rho_f) - \frac{\Lambda_s}{D_H}\rho_s\frac{U_s^2}{2} + \frac{\Lambda_f}{D_H}\rho_f\frac{U_f^2}{2}$$

Lorsque le fluide est un gaz nous mettons l'indice g à la place de f et nous admettrons que $\frac{p}{\rho_g} = C^{te}$. $\bar{p}$ étant fonction de x il n'est pas possible en toute rigueur d'observer un régime établi car ρ_g est fonction de x. Mais on peut toujours distinguer une région d'entrée où les termes des premiers membres des équations (14) et (15) sont prépondérants et où la structure de l'écoulement imposée à l'entrée du conduit joue un rôle essentiel et une région de régime pseudo établi où c varie lentement avec x et où $\frac{d\bar{p}}{dx}$ est pratiquement une constante sur une grande longueur du conduit.

Dans une expérience donnée où q_s et q_f sont connus, les seules grandeurs facilement mesurables sont $\bar{p}$ et c. Comme on ne dispose que de deux équations pour déterminer les 3 inconnues Λ_s, Λ_g, C_D, il faut nécessairement introduire une hypothèse supplémentaire, d'origine expérimentale, pour calculer ces 3 inconnues.

DEUXIEME PARTIE

APPLICATION DES EQUATIONS GENERALES

A UN COURANT VERTICAL ASCENDANT.

N O T A T I O N S

c - concentration spatiale moyenne du solide dans une section droite du conduit

C_D - coefficient de traînée moyen des particules

d - diamètre moyen des particules solides

D - diamètre du conduit de transport

$\mathcal{F}$ - nombre de Froude

g - accélération de la pesanteur

p - pression instantanée locale

q_s - débit massique de particules

q_g - débit massique de gaz

q - rapport des débits masse = $\frac{q_s}{q_g}$

q_{vs} - débit volumique de particules

q_{vg} - débit volumique de gaz

q_v - rapport des débits volume = $\frac{q_{vs}}{q_{vg}}$

$\mathcal{R}_e$ - nombre de Reynolds

S - section droite du conduit de transport

U_s - projection de la vitesse du solide sur la direction orientée des génératrices du conduit.

U_g - projection de la vitesse du gaz sur la direction orientée des génératrices du conduit.

$\mathcal{U}_s$ - vitesse débitante des particules solides

$\mathcal{U}_g$ - vitesse débitante du gaz

w - vitesse de chute d'une particule solide dans le fluide immobile

X - périmètre de la section droite du conduit de transport

Δp - différence entre les pressions moyennes en deux points situés sur la même génératrice du conduit dans deux sections droites distantes de L.

Λ_g - coefficient de perte de charge du gaz

Λ_s - coefficient de frottement des particules analogue au coefficient de frottement pour le gaz

Λ_{gv} - coefficient de frottement total pour le gaz et les particules solides dans un conduit vertical

ρ_s - masse volumique des particules

ρ_g - masse volumique du gaz

Indices

s - pour les particules solides
g - pour le gaz.

Les autres notations sont définies dans le texte.

2 - APPLICATION DES EQUATIONS GENERALES, EN REGIME ETABLI, A UN COURANT VERTICAL ASCENDANT.

Dans un conduit vertical ($\theta = \pi$) la pesanteur est sans influence sur la répartition des concentrations dans une section droite du tube qui est horizontale. Cette répartition s'éloigne peu de la répartition uniforme et si l'on se trouve en dehors de la zone située immédiatement à l'aval du coude l'hypothèse $\beta_s = \beta_g = \beta_{ps} = \beta_{pg} = 1$ doit être voisine de la réalité. D'autre part quand le régime est établi $\mathcal{U}_s$ et $\mathcal{U}_g$ sont indépendants de x.

Dans ces conditions et si les variations de pression et de température sont suffisamment faibles, dans une section, devant leurs valeurs moyennes correspondantes on peut considérer ρ_g constant et donc $\mathcal{U}_g$ constant dans une section.

Par conséquent il est possible de confondre les vitesses moyennes et les vitesses débitantes dans une section tant pour le gaz que pour les particules et l'on écrira dans le cas du conduit vertical, en régime établi :

$$\mathcal{U}_g = U_g$$

$$\mathcal{U}_s = U_s$$

En tenant compte des équations (3) et (4) qui s'écrivent :

$$(3)' \qquad c\, U_s\, S\, \rho_s = q_s$$

$$(4)' \qquad (1-c)\, U_g\, S\, \rho_g = q_g$$

les équations (14) et (15) deviennent :

$$(16) \quad -\frac{d\bar{p}}{dx} = \frac{q_s}{S}\frac{\Lambda_s}{2D}U_s + \frac{q_g}{S}\frac{\Lambda_g}{2D}U_g + \left[\rho_s c + \rho_g(1-c)\right]g$$

$$(17) \quad \frac{\Lambda_s}{D}\rho_s\frac{U_s^2}{2} - \frac{\Lambda_g}{D}\rho_g\frac{U_g^2}{2} = \frac{3\,C_D}{4d}\rho_g\frac{(U_g-U_s)^2}{(1-c)} - g(\rho_s-\rho_g)$$

En posant :

$$\frac{\Lambda_s}{D}\rho_s\frac{U_s^2}{2} = A \quad , \quad \frac{\Lambda_g}{D}\cdot\frac{\rho_g U_g^2}{2} = B$$

et $J = -\frac{d\bar{p}}{dx} - \left[\rho_s c + \rho_g (1-c)\right] g$

les équations (16) et (17) s'écrivent :

(18) $Ac + B(1-c) = J$

(19) $A-B = \frac{3C_D}{4d}\rho_g \frac{(U_g-U_s)^2}{1-c} - g(\rho_s-\rho_g)$

On peut remarquer que si on mesure U_s on en déduit c à l'aide de l'équation (3)' puis U_g à l'aide de l'équation (4)'.

De même si on mesure c on peut déduire U_s puis U_g à l'aide des mêmes équations.

Connaissant U_s, U_g, c et $\frac{d\bar{p}}{dx}$ que l'on mesure, il reste à déterminer 3 inconnues au moyen des deux équations (18) et (19). Il faut donc introduire une hypothèse supplémentaire pour trouver les 3 inconnues A, B et C_D.

Or même en admettant que A et B sont du même ordre de grandeur, l'équation (18) donne une bonne approximation de B en écrivant $B = \frac{J}{1-c}$ car c étant petit devant 1, Ac est petit devant B (1-c).

Si A est de l'ordre de B, l'équation (19) donne

(20) $\frac{3C_D}{4d}\rho_g\frac{(U_g-U_s)^2}{1-c} = g(\rho_s-\rho_g)$

et si A = 0

(21) $\frac{3C_D}{4d}\rho_g\frac{(U_g-U_s)^2}{1-c} = g(\rho_s-\rho_g) - \frac{J}{1-c}$

Mais l'expérience montre que $\frac{J}{1-c}$ est toujours très petit devant $g(\rho_s-\rho_g)$,

par conséquent les valeurs de C_D obtenues à partir des équations (20) et (21) sont très voisines et les conclusions tirées du calcul de C_D à partir de l'hypothèse A = o doivent être très valables.

Par contre les conclusions relatives aux variations de Λ_g en faisant A = o, doivent être bonnes tant que les valeurs de c restent petites devant 1, mais elles sont peut être à corriger pour des valeurs de c plus grandes.

En fait on a :

$$\frac{B}{A} = \frac{\Lambda_g}{\Lambda_s} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_s} \left(\frac{U_g}{U_s} \right)^2$$

Si on prend pour Λ_g la valeur correspondant à l'écoulement monophasique c'est à dire $\Lambda_g = 0{,}02$

$$\Lambda_s = 10^{-4}, \qquad \frac{\rho_g}{\rho_s} = 10^{-3}, \qquad \frac{U_g}{U_s} = 2$$

on obtient $\frac{B}{A} = 0{,}8$

Pour c = 0,02 on a $\frac{Ac}{B(1-c)} = 0{,}025$

En négligeant Ac devant B (1-c) on fait donc une erreur sur B de 2,5 %.

Pour c = 0,15, valeur qui peut être considérée comme élevée, et

$\Lambda_s = 10^{-4}$, $\Lambda_g = 0{,}2$, c'est à dire un coefficient 10 fois plus grand que celui correspondant à l'écoulement monophasique, et toujours pour les mêmes valeurs de

$\frac{\rho_g}{\rho_s}$ et $\frac{U_g}{U_s}$ on trouve :

$\frac{B}{A} = 8$ et $\frac{Ac}{B(1-c)} = 0{,}022$

l'erreur sur B est de 2,2 % lorsqu'on néglige Ac.

Pour les mêmes valeurs de c, Λ_g, $\frac{\rho_g}{\rho_s}$ et $\frac{U_g}{U_s}$ mais avec $\Lambda_s = 5.10^{-4}$

l'erreur sur B n'est encore que de 11 %, et elle n'atteint 22 % que si $\Lambda_s = 10^{-3}$

En réalité, comme on le verra dans la partie expérimentale, les valeurs obtenues pour les concentrations spatiales moyennes en volume c, au cours de cette recherche, sont en général inférieures à 15 % et, pour la plupart, comprises entre 1 et 10 %.

D'autre part, avec les résultats expérimentaux dont on dispose, on peut remarquer qu'en adoptant pour Λ_g la valeur minimale, c'est à dire celle correspondant à l'écoulement du gaz seul, Λ_s est toujours d'un ordre inférieur à celui de Λ_g.

Compte tenu des valeurs de concentration spatiale étudiées lors de ces travaux, on peut donc faire A = o, ce qui revient à admettre que Λ_s est pratiquement nul, et de considérer, dans le cas d'un écoulement turbulent biphasique en conduit vertical ascendant et en régime établi, un coefficient unique, que nous appellerons Λ_{gv}, analogue au coefficient de frottement pour le gaz.

Le coefficient Λ_{gv} englobe le coefficient moyen de frottement pour le gaz et le coefficient moyen de perte de quantité de mouvement par chocs des particules solides sur les parois.

Ceci reste valable tant que les fluctuations des différentes grandeurs locales restent petites devant leurs valeurs moyennes.

Dans ces conditions il est donc possible en mesurant $\frac{d\bar{p}}{dx}$, la vitesse U_s ou la concentration spatiale moyenne c, de déterminer les 2 inconnues Λ_{gv} et C_D à partir des équations (18) et (19) qui deviennent :

$$(22)\quad \Lambda_{gv} = \frac{J}{1-c} \cdot \frac{2\,D}{\rho_g\, U_g^2}$$

$$(23)\quad C_D = \frac{4 d\,(1-c)}{3\,\rho_g\,(U_g-U_s)^2}\left[g\,(\rho_s-\rho_g) - \frac{J}{1-c}\right]$$

A noter que J est déduit de la mesure de $\frac{d\bar{p}}{dx}$ de laquelle on retranche le terme $\left[\rho_s c + \rho_g (1-c)\right] g$, qui représente la pression hydrostatique dans le conduit vertical. Pour les fortes concentrations la chute de pression, par unité de longueur dans le tube est, pour une très grande part, due au gradient hydrostatique de pression déterminée par la masse volumique de la suspension,

c'est à dire par la concentration spatiale du produit solide. Il est donc nécessaire de déterminer soit c soit U_s.

Au cours de nos travaux nous avons mesuré, selon la nature des particules, soit directement la concentration spatiale c soit la vitesse U_s des particules.

TROISIEME PARTIE

INSTALLATION D'ESSAIS

DISPOSITIFS DE MESURE

3 - INSTALLATION D'ESSAIS ET DISPOSITIFS DE MESURE

31 - DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

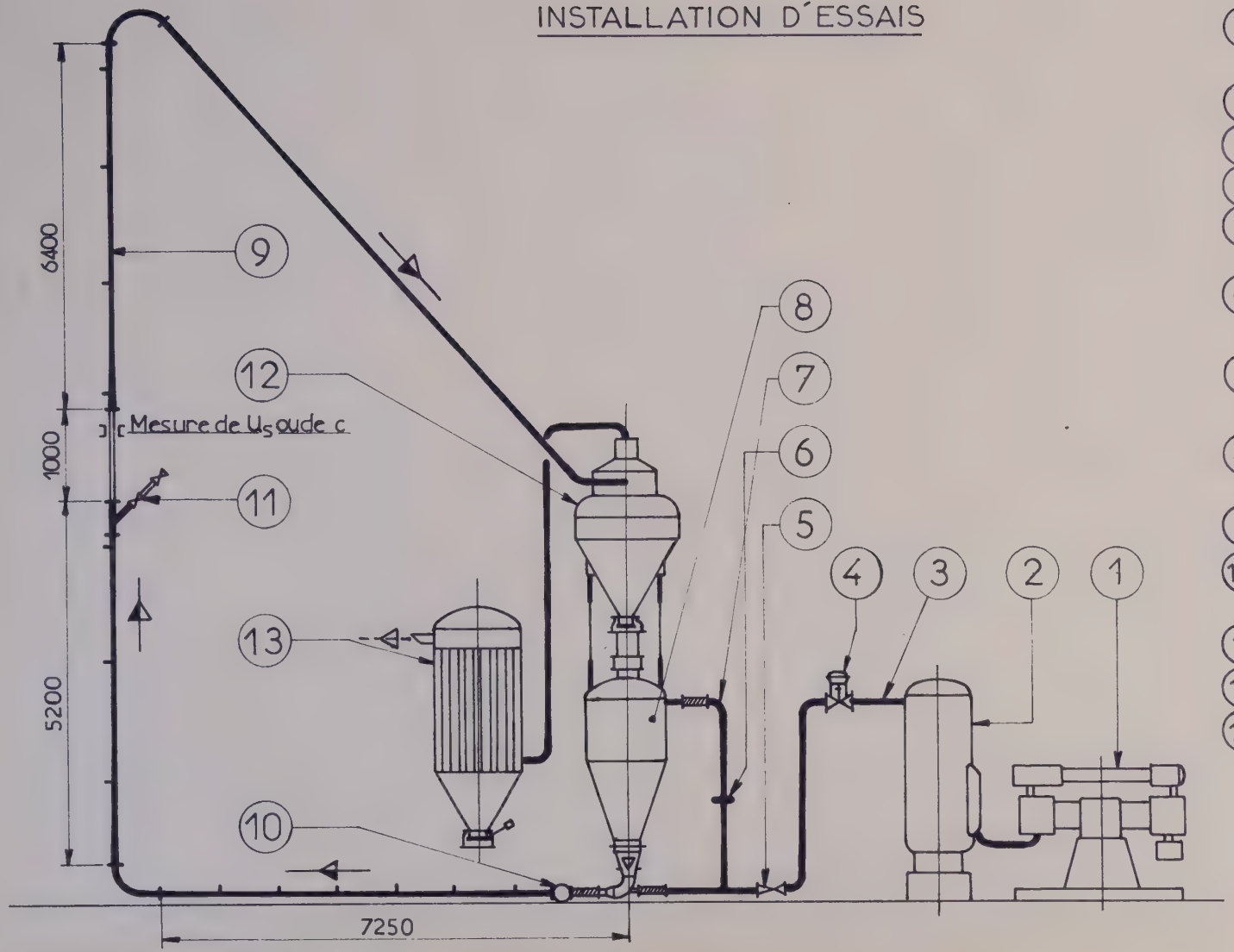
L'installation d'essai a été prévue avec un conduit vertical ascendant suffisamment long de manière à pouvoir disposer d'une zone de mesure loin de toute singularité en particulier du coude amont.

L'installation fonctionne par refoulement, c'est à dire que tous les éléments de l'installation se trouvent en pression par rapport à l'atmosphère, les appareils de réception se trouvant à la pression atmosphérique ou à une pression très voisine. Le dispositif d'introduction et de mise en vitesse du produit est par contre en pression, il doit donc être constitué d'un organe étanche.

L'installation, suivant le schéma de la figure 1, comprend essentiellement :

(1) - un compresseur à pistons secs pouvant fonctionner jusqu'à une pression relative de 7 bar
(2) - un réservoir tampon
(3) - une conduite d'air principale
(4) - un régulateur de pression
(5) - une tuyère interchangeable à col cylindrique fonctionnant en régime sonique
(6) - une tuyauterie d'équilibrage aboutissant à la partie supérieure du réservoir d'expédition
(7) - un diaphragme permettant de mesurer le débit d'air passant par le conduit (6)
(8) - un réservoir d'expédition pesé d'un volume de 2000 litres et recevant la matière à transporter
(9) - un conduit de transport interchangeable
(10) - une vanne d'isolement à manchon à déformation élastique

INSTALLATION D'ESSAIS



(1) Compresseur à pistons secs pouvant fonctionner jusqu'à une pression relative de 7 bar.

(2) Réservoir tampon.

(3) Conduite d'air principale.

(4) Régulateur de pression.

(5) Tuyère interchangeable à col cylindrique fonctionnant en régime sonique.

(6) Tuyauterie d'équilibrage aboutissant à la partie supérieure du réservoir d'expédition.

(7) Diaphragme permettant de mesurer le débit d'air passant par le conduit (6).

(8) Réservoir d'expédition pesé d'un volume de 2000 litres et recevant la matière à transporter.

(9) Conduit de transport interchangeable.

(10) Vanne d'isolement à manchon à déformation élastique.

(11) Dispositif d'introduction des particules marquées.

(12) Récepteur séparateur air-matière.

(13) Filtre à manches destiné à épurer l'air de transport avant son rejet à l'atmosphère.

Figure. 1

(11) - un dispositif d'introduction des particules marquées
(12) - un récepteur-séparateur air-matière
(13) - un filtre à manches destiné à épurer l'air de transport avant son rejet à l'atmosphère.

Afin d'éviter l'usure des parois des changements de direction et de limiter la réduction de calibre des particules les coudes ont été réalisés en tuyauterie de caoutchouc anti-abrasion à grand rayon de courbure ($R \geqslant 10\ D$).

Le fonctionnement de l'installation est le suivant :

Le produit stocké dans la partie basse du récepteur-séparateur (12) est introduit par gravité dans le réservoir d'expédition (8) dont l'orifice d'évacuation inférieur est fermé ainsi que la vanne (10) sur le conduit de transport.

Après remplissage, on referme l'orifice supérieur du réservoir et on le met sous pression par l'intermédiaire de la tuyauterie d'équilibrage (6). Une fois la pression de fonctionnement atteinte, on ouvre l'orifice inférieur du réservoir ainsi que la vanne d'isolement (10) de manière que le produit s'écoule dans la pièce de mise en vitesse et soit refoulé dans le conduit de transport aboutissant au récepteur-séparateur (12), dont l'orifice inférieur est fermé durant le transfert.

Dans cet appareil s'effectue la séparation de l'air et de la matière, celle-ci s'accumulant à la partie basse du récepteur tandis que l'air est rejeté à l'atmosphère après passage dans le filtre à manches.

Le réservoir d'expédition, qui est pesé, est isolé des tuyauteries rigides d'air et de transport au moyen d'éléments flexibles.

Trois conduits de transport différents ont été utilisés au cours de cette recherche :

1) diamètre nominal 32 mm - D réel moyen = 31,6 mm
2) diamètre nominal 50 mm - D réel moyen = 49,5 mm
3) diamètre nominal 80 mm - D réel moyen = 78,9 mm

nature des parois pour les 3 conduits : acier XC 35 F

32 - DISPOSITIFS DE MESURE

321 - Détermination du débit-masse de particules.

Le débit-masse moyen de transport q_s est déterminé, pour chaque essai, à l'aide d'un dispositif permettant une pesée continue du réservoir d'expédition (8). Le réservoir d'expédition est suspendu par 3 tirants, disposés à 120°, lesquels comportent chacun sur leur fibre neutre une jauge extensométrique.

Les 3 jauges sont reliées à un enregistreur à deux pistes permettant d'enregistrer simultanément et en continu la masse du réservoir et la pression dans ce dernier.

En effet, afin d'obtenir un débit-matière régulier au cours d'un même essai, il est nécessaire de maintenir une pression constante au dessus des particules et pour cela alimenter le réservoir à sa partie supérieure en air comprimé par l'intermédiaire de la tuyauterie d'équilibrage (6).

Sur la figure 2 on trouvera la reproduction d'un enregistrement d'un essai de transport de sable.

Il faut remarquer également que la régularité du débit-matière et la possibilité d'atteindre des concentrations élevées dépendent beaucoup de la forme et des dimensions de la pièce de mise en vitesse. On trouvera en annexe (figure A1) la description du dispositif utilisé au cours de nos travaux.

On peut considérer qu'avec ce type d'appareillage, le débit-masse de particules est déterminé avec une précision de l'ordre de 1 %.

322 - Détermination du débit-masse d'air

Le débit-masse d'air est mesuré au moyen d'une tuyère sonique (suivant le profil de la figure A2 en annexe).

$$q_{g1} = C_q . A . S_c . \frac{P_{am}}{\sqrt{T_{am}}}$$

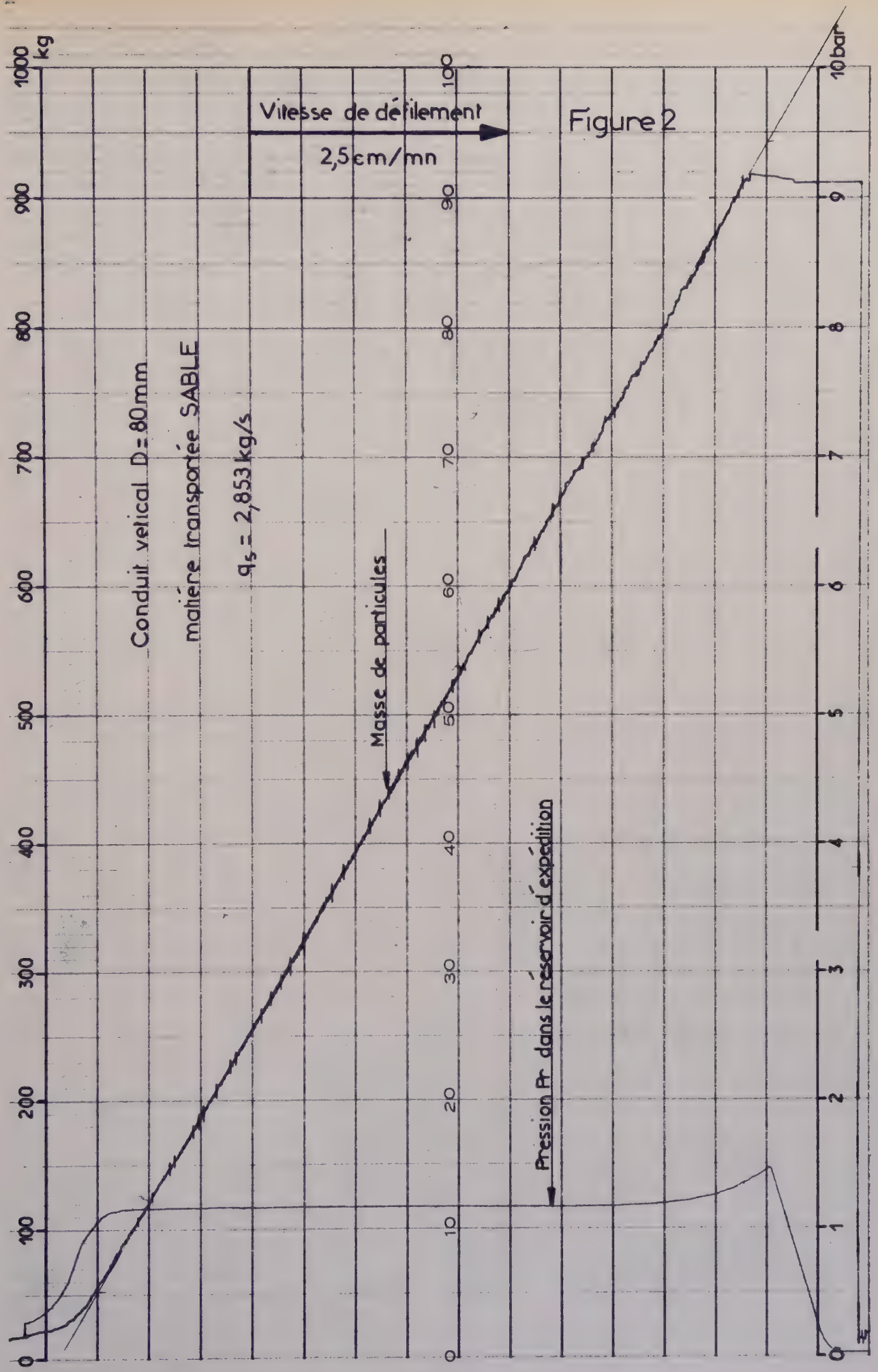


Figure 2
Vitesse de défilement
2,5 cm/mn
Conduit vetical D = 80mm
matière transportée SABLE
q_s = 2,853 kg/s
Masse de particules
Pression Pr dans le réservoir d'expédition
kg
bar
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

avec q_{g1} = débit masse d'air

P_{am} = pression d'arrêt amont

T_{am} = température d'arrêt amont

S_c = section au col

A = coefficient de détente qui est fonction des conditions amont :

$A = 0{,}040735 - 8{,}8084.10^{-7}. T_{am}$

pour $P_{am} < 10$ bar

et $250 < T_{am} < 1000°K$

C_q = coefficient de débit qui dépend du nombre de Reynolds $\mathcal{R}_c$ défini au col sonique.

$C_q = 1 - 7{,}24. \mathcal{R}_c^{-0{,}25}$

pour $10^4 \leqslant \mathcal{R}_c \leqslant 3{,}66.10^5$

La température de l'air est mesurée en amont de la tuyère à l'aide d'un thermomètre plongé dans un doigt de gant rempli d'huile.

Deux manomètres de précision, à lame, permettent de mesurer les pressions en amont et en aval de la tuyère et de vérifier que l'on se trouve en régime sonique.

Pour les essais nous avons utilisé 4 tuyères soniques ayant comme diamètre au col respectivement : 5 - 6 - 7,5 et 11 mm.

Ces tuyères complétées par le régulateur de pression (4) avec lequel on peut faire varier P_{am} de 7 à 0,5 bar, permettent de couvrir une large plage de vitesses dans chacun des 3 conduits de transport.

Dans tous les essais nous avons travaillé en régime sonique, (le rapport P aval / P amont restant inférieur à 0,7 pour une tuyère à divergent à 7°) (voir figure A2 en annexe). La précision obtenue sur la mesure du débit-masse d'air peut être estimée comme étant de l'ordre de 1 %.

A noter qu'un capteur de pression, placé à la partie supérieure du réservoir d'expédition, est relié à l'une des 2 pistes de l'enregistreur. De cette manière on peut contrôler et mesurer la pression dans le réservoir qui doit rester constante afin de ne pas influencer le débit q_s de particules.

Remarque.

Le mode de fonctionnement retenu qui consiste à utiliser un réservoir d'expédition étanche par rapport à l'atmosphère durant la période de transport est particulièrement bien adapté pour la détermination des débits de gaz et de particules.

En effet, à l'aide de la tuyère sonique on peut déterminer avec une très bonne précision le débit-masse d'air q_{g1} fourni par le compresseur, et tenant compte du débit-masse d'air q_{g2} nécessaire pour maintenir le réservoir d'expédition (8) à pression constante, on déduit le débit-masse d'air q_g effectivement utilisé pour le transport des particules solides dans le conduit (9). Le débit-masse d'air q_{g2} est calculé à partir du débit-masse q_s de particules obtenu par pesé :

$$q_{g2} = \frac{q_s}{\rho_s} \cdot \rho_{g2}$$ où ρ_{g2} représente la masse volumique de l'air déterminée aux conditions régnant dans le réservoir d'expédition.

Le débit-masse d'air q_g réellement utilisé pour le transport, avant la vidange complète du réservoir d'expédition est donc :

$$q_g = q_{g1} - q_{g2}$$

Ce sont ces valeurs, q_g et q_s, que l'on a retenues, dans les dépouillements d'essais, pour la détermination des rapports des débits-masse $q = \frac{q_s}{q_g}$ et des débits-volume $q_v = \frac{q_{vs}}{q_{vg}}$.

323 - PERTES DE CHARGE

Nous avons disposé sur le conduit de transport, aussi bien sur la partie horizontale que sur la partie verticale, des prises de pression statique telles que représentées sur la figure A3 en annexe.

Sur le conduit horizontal 6 prises de pressions sont distantes de 0,900 m et sur le conduit vertical il a été prévu 7 prises distantes de 1,800 m. Ces prises sont reliées à des manomètres, à eau ou à mercure, placés sur un tableau central. Le branchement des manomètres est réalisé suivant le schéma de la figure 3. Sur le conduit vertical on relève en plus des chutes de pression entre les différentes sections, la pression relative sur la première prise de pression de manière à pouvoir déterminer la masse volumique ρ_g du gaz au point de mesure de la vitesse U_s des particules ou de la concentration spatiale moyenne c.

Le relevé des différentes pressions est effectué par lecture directe pour la plupart des essais. Il est doublé par des prises de vues photographiques qui sont surtout utiles lorsque les essais sont réalisés à concentrations élevées c'est à dire pour des débits matière importants qui correspondent à des temps de transfert relativement courts

3231 - Perte de charge du fluide seul

Pour chaque série d'essais on relève la perte de charge dans le conduit de transport de l'écoulement de l'air seul et on la compare à la valeur théorique obtenue à partir de la relation :

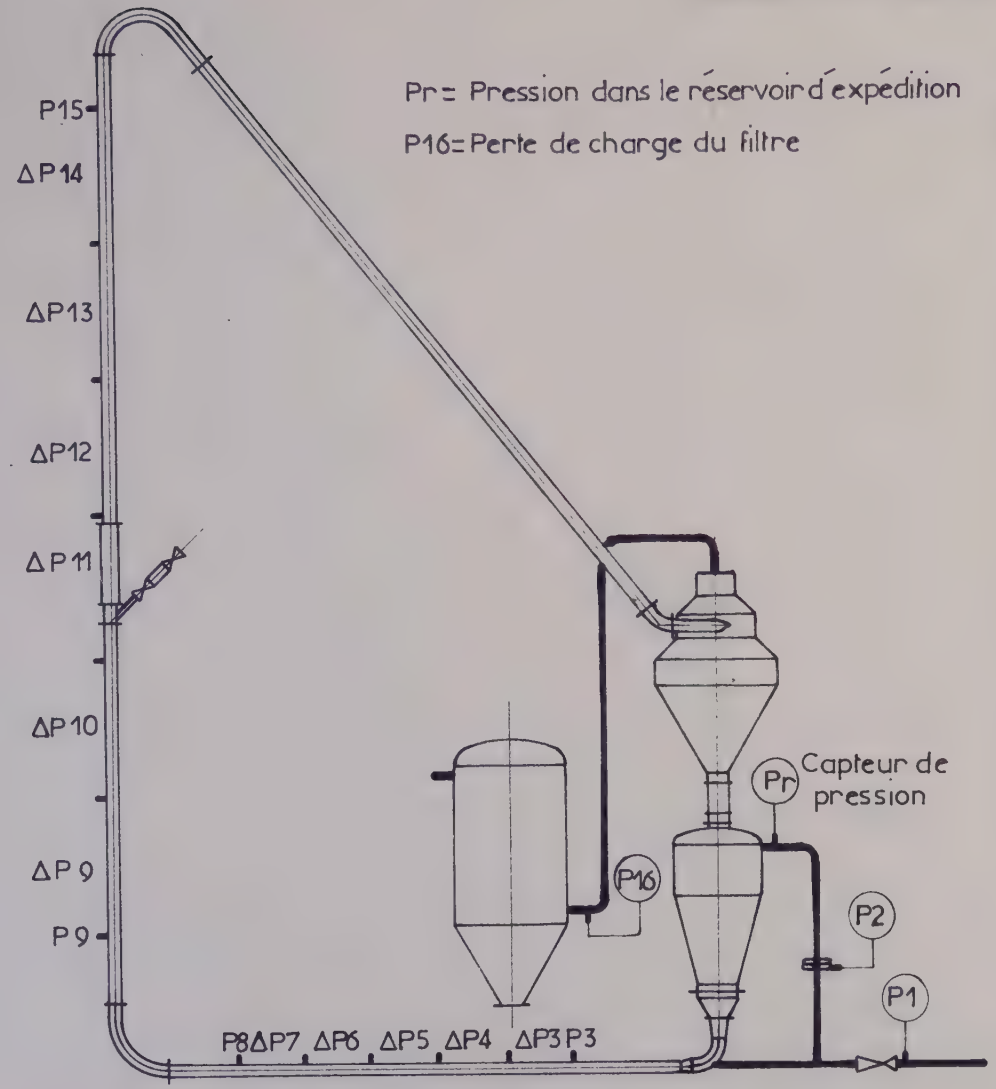
$$\Delta_{pg} = \Lambda_g \frac{L}{D} \rho_g V_g^2$$

où $\Lambda_g = 0{,}316\ \mathcal{R}_g^{-\frac{1}{4}}$ = coefficient de perte de charge correspondant à l'écoulement du gaz seul (Blasius)

$\mathcal{R}_g = \frac{\rho_g V_g D}{\mu_g}$ = nombre de Reynolds du gaz

ρ_g = masse volumique du gaz

DISPOSITION DES PRISES DE PRESSION SUR L'INSTALLATION ET BRANCHEMENT DES MANOMETRES



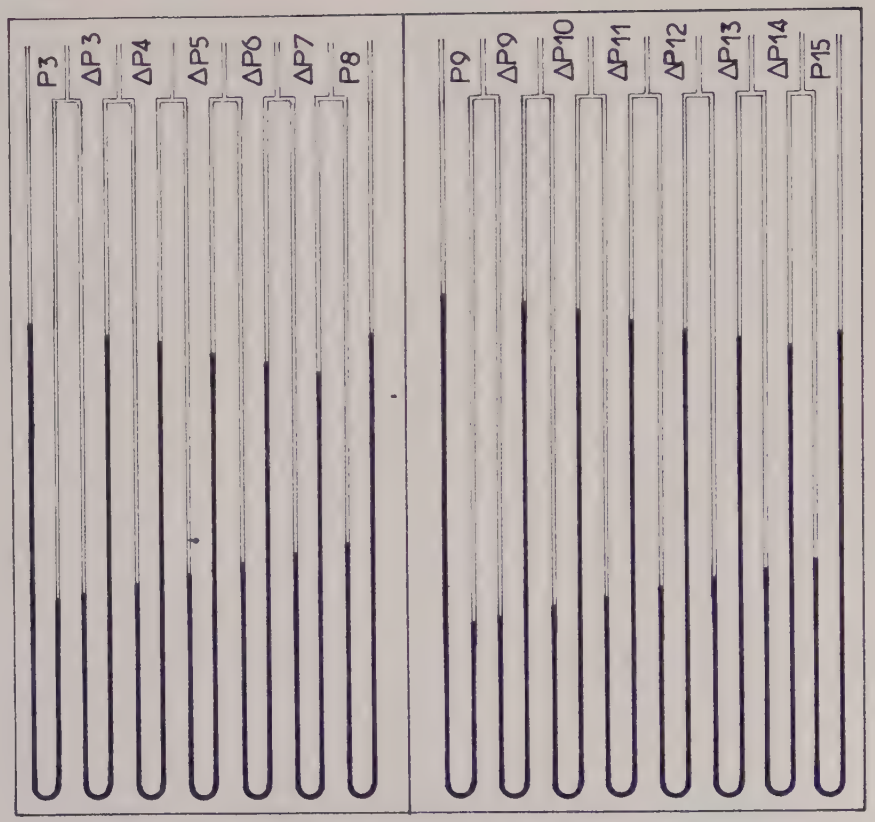


Tableau central des manomètres à eau ou à mercure

Figure 3

V_g = vitesse du gaz, dans le conduit de diamètre D, en écoulement monophasique

μ_g = coefficient de viscosité dynamique du gaz

L = longueur du conduit

Les écarts relevés, pour l'air seul, entre les pertes de charge calculées et mesurées sont de l'ordre de 3 à 4 %, selon le diamètre des conduits, dans la zone des vitesses étudiées au cours des essais c'est à dire pour $3 \cdot 10^4 < \mathcal{R}_g < 10^5$.

Pour le dépouillement des essais nous avons calculé la perte de charge théorique Δp_g, déterminée à partir de la relation de Blasius.

3232 - Suspension

En ce qui concerne les pertes de pression correspondant à l'écoulement de la suspension, elles sont relevées également avec les manomètres à eau ou à mercure suivant la valeur de la concentration spatiale moyenne.

Cependant, lorsque les concentrations sont élevées, les fluctuations deviennent importantes et de ce fait la précision sur Δp diminue. Ces fluctuations sont fonction du rapport $q = \frac{q_s}{q_g}$, et il a été prévu pour les atténuer d'intercaler des rétrécissements de section sur les tubes des manomètres (voir figure A4, en annexe).

Tant que l'écoulement reste stable, la lecture des manomètres est faite à 1 ou au plus à 2 mm près. Par contre, pour des valeurs élevées du rapport des débits masse $q = \frac{q_s}{q_g}$, et des basses vitesses d'air, les fluctuations ont tendance à augmenter et l'on est amené dans ce cas à prendre les valeurs moyennes des écarts enregistrés.

Les essais pour lesquels les fluctuations sont trop grandes n'ont pas été retenus. Toutefois nous avons indiqué dans les conclusions les plus grandes valeurs de q enregistrées au cours de ces travaux.

La précision peut être estimée comme étant de l'ordre de 1 à 5 % lorsque l'écoulement reste relativement stable.

Les mesures ont été effectuées dans une zone où le régime est établi.

On considère que l'on se trouve dans une telle zone lorsque le gradient de pression statique le long du conduit devient constant.

La figure A5, en annexe, donne les valeurs des pressions statiques $\frac{dp}{dx}$ relevées le long du conduit vertical pour quelques essais, à différents q.

324 - MESURE DE LA VITESSE U_s DES PARTICULES ET DETERMINATION DE LA CONCENTRATION SPATIALE MOYENNE c DANS UNE SECTION DU CONDUIT.

Comme nous l'avons vu dans la deuxième partie, il est nécessaire, afin de pouvoir calculer la pression hydrostatique dans le conduit vertical, soit de mesurer la vitesse U_s des particules pour déterminer la concentration spatiale moyenne c, soit de mesurer directement c et en déduire U_s.

Pour nos essais nous avons finalement retenu deux procédés qui ont été choisis en fonction des dimensions des particules. Mais on peut considérer qu'ils donnent tous deux des résultats avec des précisions très voisines.

Pour les grosses particules comme les granulés de polyéthylène et le blé (d de l'ordre de 3,6 et 4 mm) nous avons mesuré la vitesse moyenne U_s des particules. Pour les fines particules comme le sable (d = 0,1 mm) nous avons mesuré la concentration spatiale moyenne c.

On trouvera en Annexe II la description du dispositif qui a été utilisé pour effectuer cette mesure.

3241 - MESURE DE LA VITESSE U_s DES PARTICULES

La méthode consiste à introduire, en cours de transport, dans l'écoulement diphasique, des particules teintées, ayant les mêmes caractéristiques physiques que celles qui sont transportées.

L'introduction est réalisée dans le conduit vertical par l'intermédiaire du dispositif représenté sur la figure A_6, et qui évite toute entrée d'air extérieur dans le conduit. En aval de ce dispositif se trouve intercalé, sur la tuyauterie de transport, un élément de conduit transparent d'une longueur de 1,00 m qui permet d'effectuer des prises de vues de l'écoulement de la suspension et des particules marquées au moyen d'une caméra.

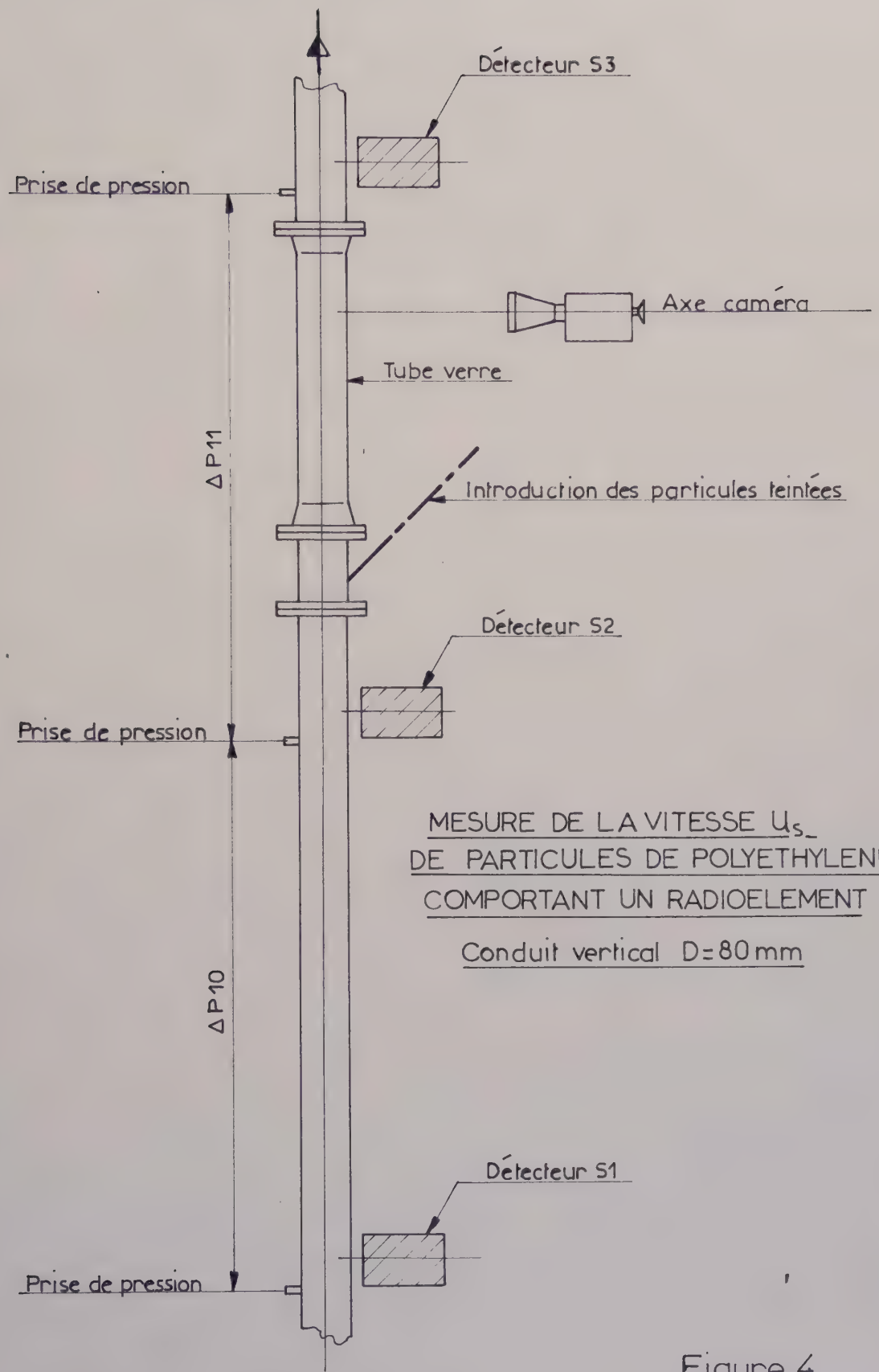
Une échelle graduée, de 1 m. de long, disposée sur le côté du conduit en verre, permet de déterminer la vitesse U_s en projetant le film image par image et en suivant la progression d'un groupe de particules teintées. En général pour chaque essai on procédait à 3 ou 4 introductions de particules, chaque groupe pouvant être suivi, le long de la règle graduée, sur 3 à 6 vues. U_s représente, pour chaque essai, la moyenne de plusieurs lectures. Les prises de vues sont réalisées dans la zone où le régime est établi.

Pour vérifier les résultats obtenus au moyen de cette méthode, on a procédé, au cours d'une quinzaine d'essais, à la mesure de la vitesse U_s en utilisant simultanément la caméra pour filmer les particules teintées et des traceurs radio-actifs placés dans un certain nombre de granulés.

La technique de marquage, mise au point par le C E N de Saclay, est particulièrement bien adaptée pour des particules de grandes dimensions (d = 3,6 mm). Elle consiste à insérer dans le grain une petite source radio-active qui ne modifie pas sensiblement la masse volumique du grain, le radio-élément étant constitué par un fil d'or 198 - période 65 heures - d'une longueur de 1 mm et d'un diamètre de 0,1 mm.

Pour obtenir une bonne répartition des grains marqués tout au long de l'essai et éviter leur groupement, les particules radio-actives, au nombre de 15, sont mélangées aux grains inactifs dans le réservoir d'expédition (9).

Le matériel de mesure comprend 3 détecteurs reliés à 3 intégrateurs SPP3 (disposition suivant fig.4) ; les impulsions provenant de ces derniers sont dirigées vers un analyseur 800 canaux, divisé en 2 fois 400 canaux. Une imprimante rapide, imprimant 20 canaux par seconde) permet d'enregistrer les valeurs des 400 canaux en 20 secondes.



MESURE DE LA VITESSE U_s
DE PARTICULES DE POLYETHYLENE
COMPORTANT UN RADIOELEMENT

Conduit vertical D=80 mm

Figure 4

Le déclenchement du balayage de l'analyseur est commandé par le grain lui-même, lors de son passage devant le détecteur S_1.

Les détecteurs S2 et S3, disposés de part et d'autre de la caméra de prises de vues des particules teintées, donnent le temps Δ_t de parcours du grain radio-actif entre les sections S2 et S3 distantes de la longueur L.

Etant donné que l'on se trouve dans une zone où le régime est établi on peut considérer que $\frac{L}{\Delta_t}$ représente la vitesse moyenne du grain.

La précision de la mesure est d'ailleurs directement liée à celle du balayage de l'analyseur. On admet qu'avec ce genre d'appareillage la précision obtenue sur la vitesse d'un grain est de l'ordre de 1 %.

Cependant, cette vitesse n'est pas constante et le temps de séjour Δ_t, pour un même essai, n'est pas le même pour tous les grains, ceux-ci suivant chacun une trajectoire différente. Mais, connaissant, pour un même essai, les vitesses individuelles de plusieurs grains on peut admettre que la moyenne arithmétique de ces vitesses est égale à la vitesse moyenne U_s des particules dans le conduit vertical.

Compte tenu des valeurs relevées au cours des essais avec les particules radio-actives on peut considérer que la mesure de la vitesse U_s est obtenue avec une précision de l'ordre de 10 %. A noter que l'on a enregistré lors d'un même essai des écarts voisins de 25 % sur environ 15 % de grains détectés.

La précision reste du même ordre de grandeur pour le dispositif basé sur le principe des prises de vues. En effet, les résultats comparatifs, qui figurent dans la partie expérimentale, montrent qu'il y a une bonne concordance entre les 2 méthodes. Le dispositif de prises de vues à l'aide de la caméra a été utilisé pour l'ensemble des essais réalisés avec les grosses particules. Ce système est particulièrement intéressant puisqu'il permet d'effectuer un grand nombre d'essais avec du matériel relativement simple. L'utilisation des traceurs radio-actifs nécessite par contre quelques précautions lors des manipulations. En outre le coût d'exploitation est nettement plus onéreux que celui des prises de vues.

3242 - MESURE DE LA CONCENTRATION SPATIALE MOYENNE c.

Pour les petites particules, d'un diamètre moyen d = 0,1 mm, la détermination de la vitesse U_s par la méthode des prises de vues au moyen d'une caméra n'est plus utilisable. En effet les particules teintées se dispersent très rapidement dès leur introduction dans le conduit.

De ce fait l'identification de points caractéristiques dans l'écoulement diphasique, lors de la projection des images, devient difficile.

On constate le même phénomène avec des particules radio-actives. Introduites dans un conduit, elles s'étalent sur une grande longueur, ce qui rend difficile le choix des "pics" sur l'enregistrement, pour déterminer la vitesse.

D'autre part, avec de petites particules on ne peut plus utiliser, comme pour des particules de grande taille, la méthode dite du "grain unique". Pour obtenir une activité suffisante, il est nécessaire d'irradier un grand nombre de particules. Du fait de leur dispersion au cours du transport, la totalité du lot de matière risque d'être contaminée. En conséquence il faut laisser l'installation au repos entre 2 essais afin de permettre au produit de perdre son activité.

Compte tenu de ces difficultés nous avons cherché à déterminer directement la concentration spatiale moyenne c de la suspension dans la section du conduit.

Le dispositif utilisé a été mis au point par le C.E.N. de Saclay. La mesure est basée sur l'atténuation du rayonnement émis par une source scellée de Strontium-Yttrium 90.

Le principe de la mesure est le suivant :

Si de part et d'autre du conduit de transport (figure 5) on dispose une source de rayons β et un détecteur de radio-activité, l'activité mesurée par ce dernier sera fonction de la concentration spatiale moyenne du mélange diphasique traversée par le faisceau.

Toutefois l'étalonnage de l'appareil constitue le problème le plus délicat.

En principe il devrait se faire à partir de suspensions relativement homogènes et stables des particules transportées, pour quelques valeurs connues de concentration, situées dans les limites que l'on estime pouvoir atteindre.

Or l'utilisation de telles suspensions est pratiquement impossible. Aussi l'étalonnage est effectué avec des cylindres de polyuréthane expansé dont les masses volumiques varient de 0,0192 g/cm3 à 0,1005 g/cm3. Les différents cylindres sont placés à l'intérieur d'une portion de conduit de dimensions identiques à celles du tube servant aux essais.

Néanmoins, afin que les rayons β ne soient pas arrêtés en totalité par le conduit, les parois de celui-ci sont amincies au droit de la source et du détecteur de manière à réduire la masse surfacique.

Il faut noter que l'utilisation d'une source β est particulièrement intéressante dans notre application étant donné que l'atténuation du rayonnement ne dépend pas du numéro atomique du matériau servant à l'étalonnage et qu'elle permet également une bonne estimation de la concentration spatiale.

La précision dépend d'ailleurs de la valeur de c : la concentration est déterminée jusqu'à 2,5 % à $\pm$ 0,1 % et jusqu'à 4 % environ à $\pm$ 0,5 %.

Dans le cadre de nos travaux, avec des particules de petites dimensions de masse volumique ρ_s = 2,58 g/cm3, les valeurs de c n'ont pas été supérieures à 4 %.

Comme on le verra dans la partie expérimentale, de telles concentrations spatiales en volume correspondent à des débits-masse q_s de particules solides relativement élevés.

Au delà de 4,5 % les rayons β sont presque totalement absorbés par la suspension. Il est nécessaire, pour des concentrations plus importantes, d'utiliser des rayons X ou γ, mais dans ce cas l'atténuation du rayonnement est fonction du numéro atomique du matériau.

DISPOSITIF DE MESURE DE LA CONCENTRATION SPATIALE c. AU MOYEN DE RAYONS β

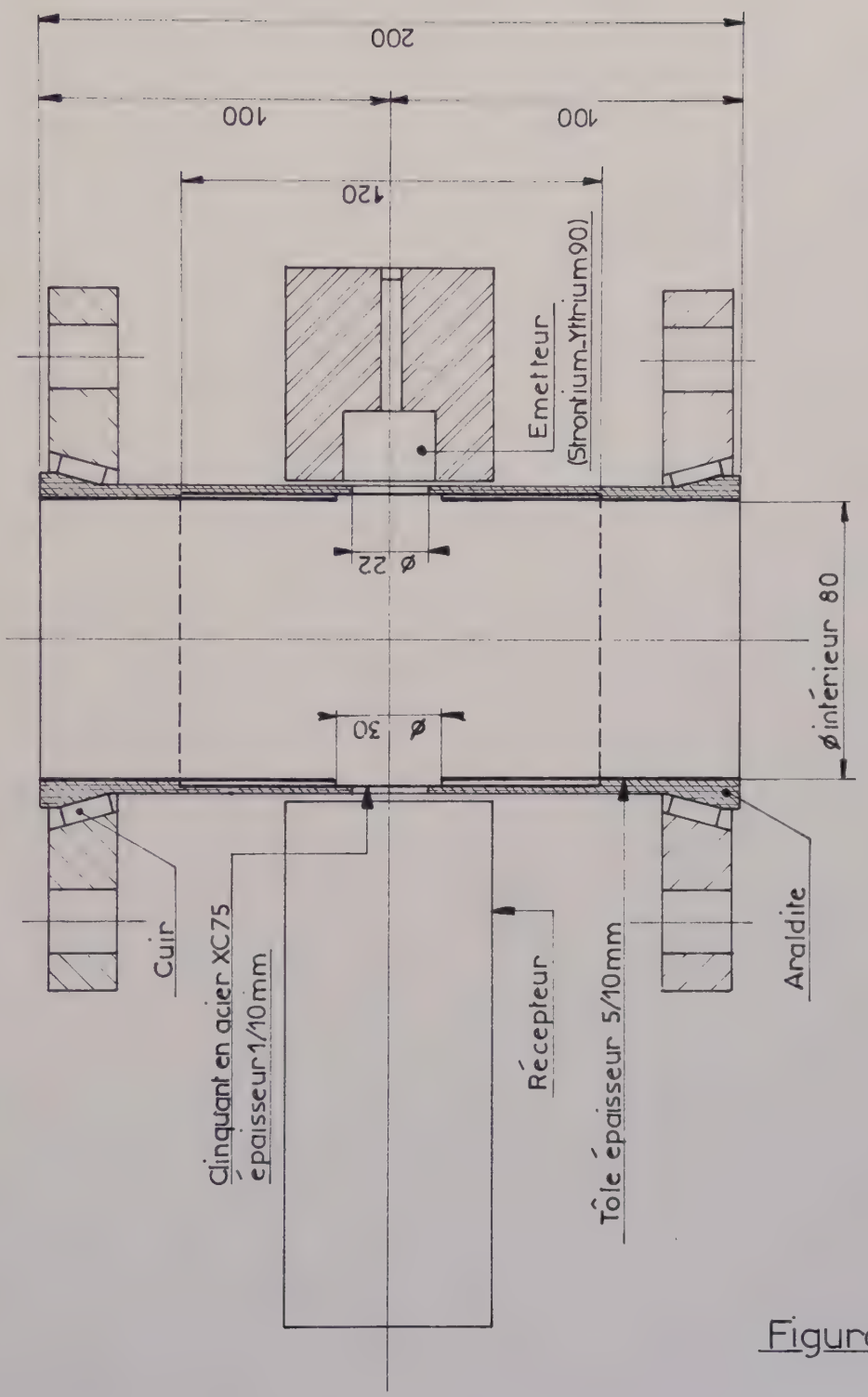


Figure 5

QUATRIEME PARTIE

ETUDE EXPERIMENTALE

4 - ETUDE EXPERIMENTALE

Dans la partie expérimentale il a été procédé à la mesure de q_s, q_g, U_s, c et $\Delta \bar{p}$ dans une zone du conduit vertical où le régime est établi de manière à pouvoir déduire, à partir des équations (22) et (23), les coefficients Λ_{go} et C_D.

Ces mesures ont été effectuées pour 4 produits différents : deux produits pulvérulents : sable et polychlorure de vinyle (PVC) en poudre, et deux produits granuleux : blé et polyéthylène. On trouvera en annexe, figure A7, les caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique de chacun des produits.

41 - Essais avec les produits granuleux

Pour les produits granuleux, polyéthylène et blé, il est procédé à la mesure de la vitesse U_s des particules à partir de laquelle on déduit la concentration spatiale moyenne c dans une section droite du conduit.

Comme indiqué dans la troisième partie, les vitesses sont déterminées par la méthode de prises de vues au moyen d'une caméra et lecture du film image par image. Cette méthode a été comparée à celle utilisant des traceurs radioactifs, la vitesse des grains étant obtenue par la mesure du temps de passage relevé entre deux détecteurs.

Ces essais comparatifs ont été effectués sur des granulés de polyéthylène dans un conduit d'un diamètre D = 80 mm. Les figures 6 et 7 reprennent les réponses enregistrées par les deux détecteurs S2 et S3 lors du passage des grains comportant un radio-élément. Ces enregistrements concernent deux essais distincts effectués avec 15 particules radioactives. Au cours de chaque essai on a pu suivre respectivement 7 et 8 grains, les autres s'étant écoulés pendant le temps d'impression (sur l'imprimante) des impulsions produites par les grains précédents.

Au cours de ces essais, réalisés pour plusieurs valeurs de q_s et q_g, on a procédé simultanément aux prises de vues des particules teintées introduites hors des périodes d'impression pour ne pas perturber l'écoulement.

Les résultats obtenus suivant les 2 méthodes ont été reportés sur la figure 8. Il s'agit en fait de vitesses moyennes déterminées pour chaque essai à partir de plusieurs grains ou groupements de grains.

Connaissant U_s, q_s, q_g et tenant compte des équations (3)' et (4)'

$$c\, U_s S \rho_s = q_s \qquad (3)'$$

$$(1-c)\, U_g S \rho_g = q_g \qquad (4)'$$

on tire $$c = \frac{q_s}{U_s S \rho_s}$$

et $$U_g = \frac{q_g}{(1-c) S \rho_g}$$

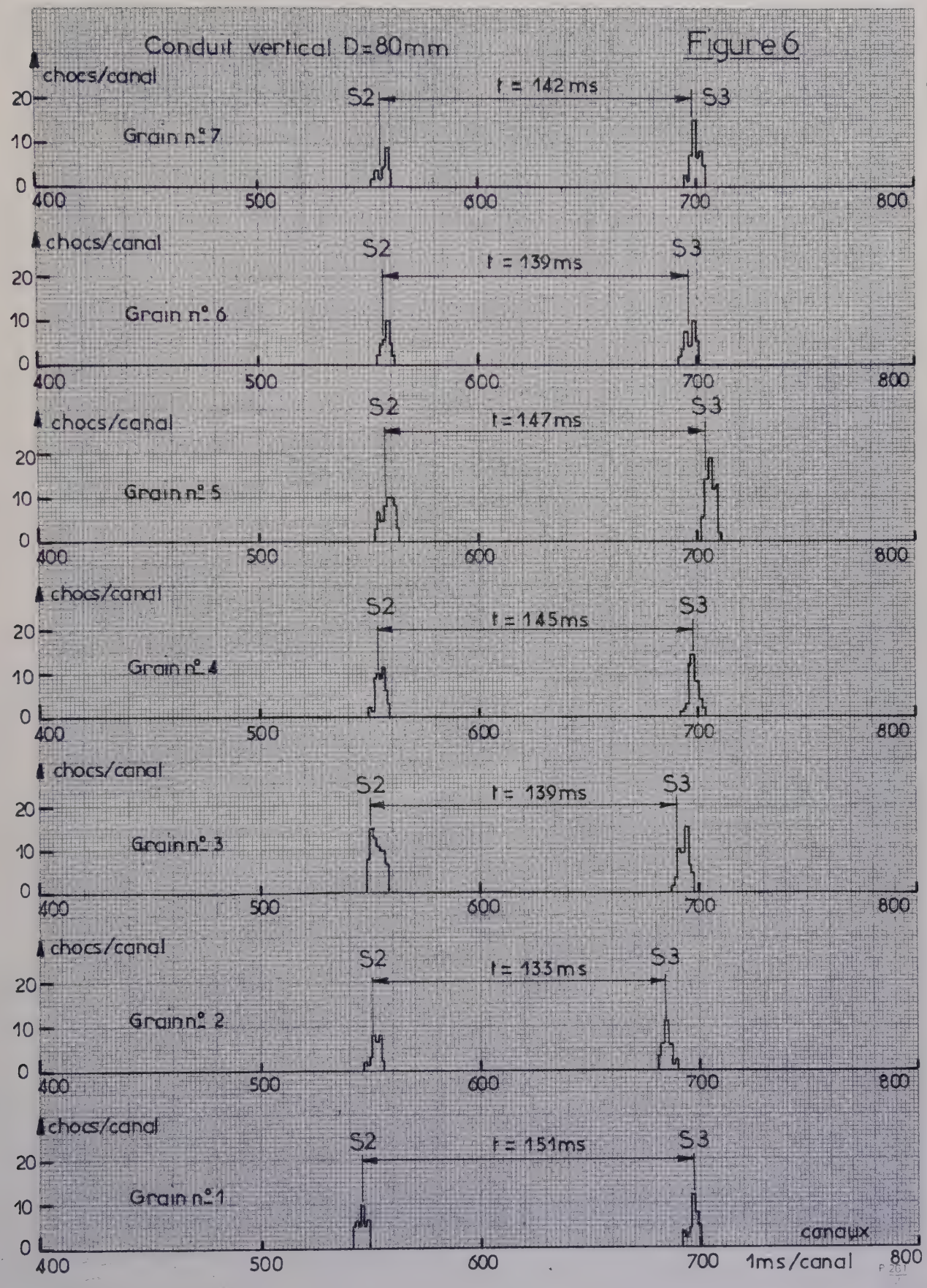
Puis à partir de la valeur de la pression statique $d\bar{p}$ relevée on détermine

$$J = -\frac{d\bar{p}}{dx} - \left[\rho_s c + \rho_g (1-c)\right] g$$

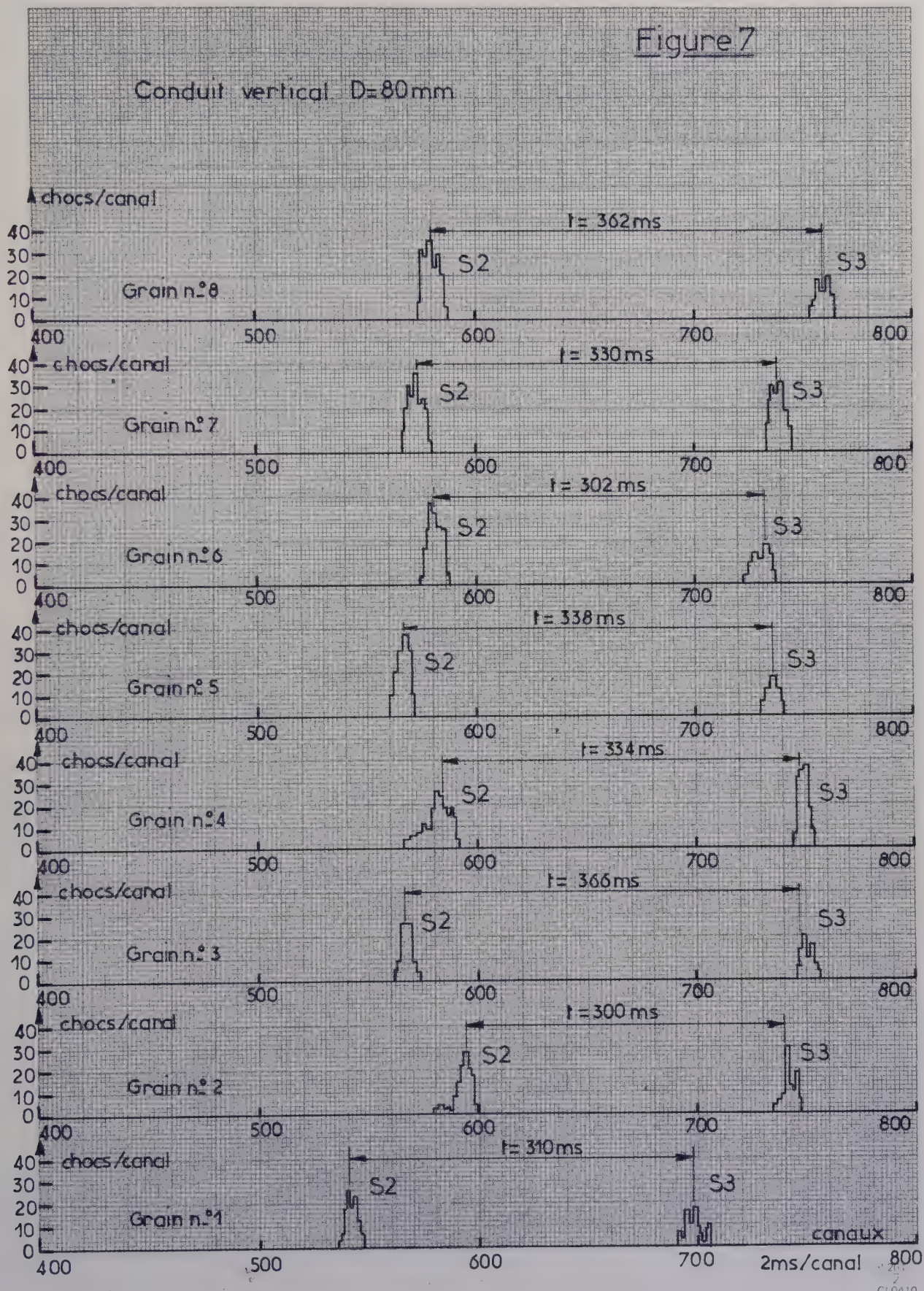
Enfin pour chaque essai on calcule Λ_{gv} et C_D avec les équations :

(22) $$\Lambda_{gv} = \frac{J}{1-c} \frac{2D}{\rho_g U_g^2}$$

(23) $$C_D = \frac{4d(1-c)}{3\rho_g (U_g - U_s)^2} \left[g(\rho_s - \rho_g) - \frac{J}{1-c} \right]$$



Mesure de la vitesse U_s des paticules de polyéthyléne au moyen de traceurs radio-actifs : 1canal= 1ms.



Mesure de la vitesse U_s des particules de polyéthylène au moyen de traceurs radio-actifs : 1 canal = 2ms

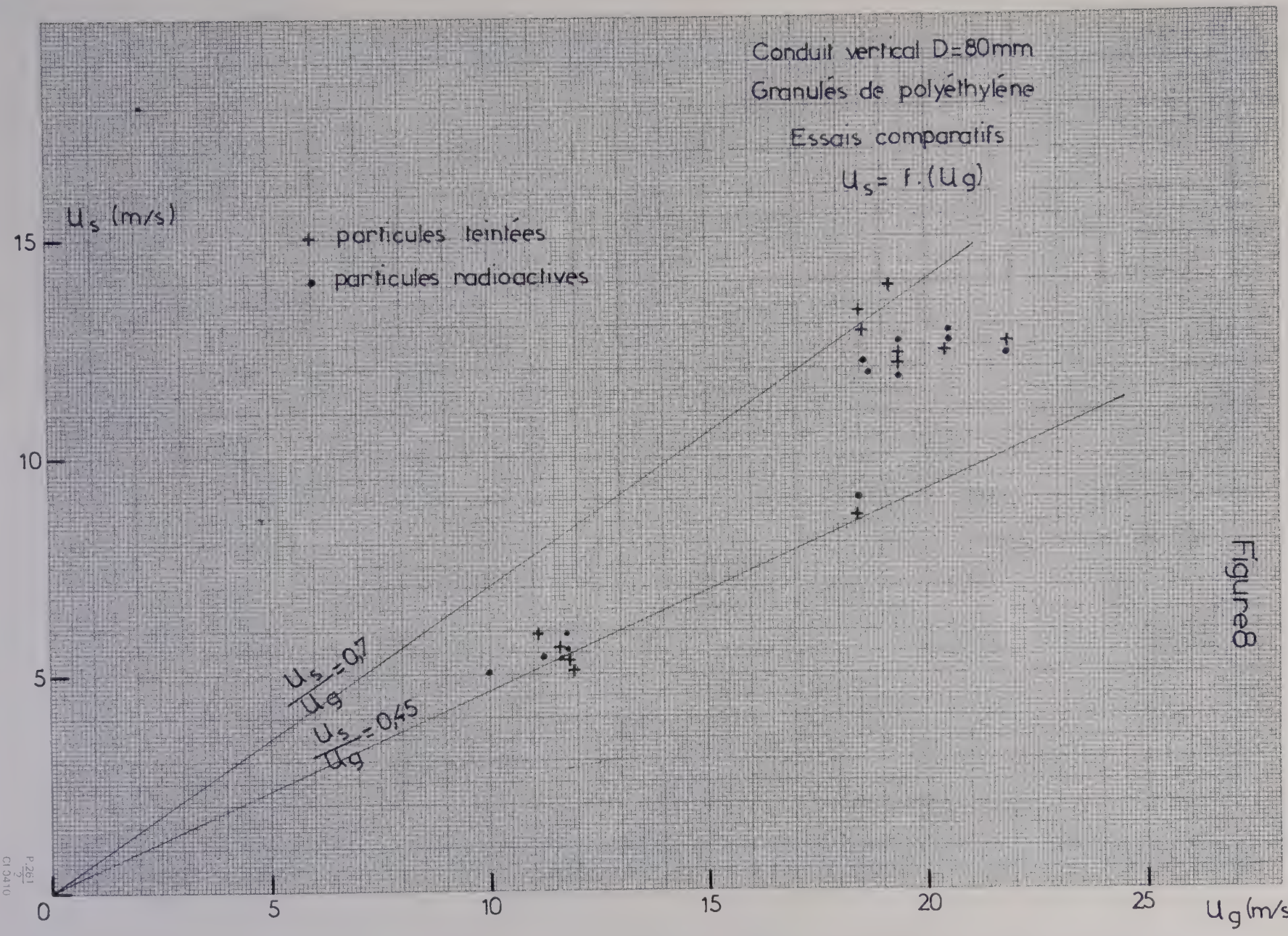

Conduit vertical D=80mm
Granulés de polyéthylène
Essais comparatifs
$U_s = f.(U_g)$
U_s (m/s)
+ particules teintées
• particules radioactives
$\frac{U_s}{U_g} = 0,7$
$\frac{U_s}{U_g} = 0,45$
15
10
5
0
5
10
15
20
25
U_g (m/s)

Figure 8

411 - Résultats obtenus avec les granulés de polyéthylène

Caractéristiques physiques des granulés
- diamètre moyen équivalent des particules d = 3,64 mm
- masse volumique ρ_s = 0,958 g/cm^3.

Les essais ont été effectués en faisant varier la concentration moyenne de transport q et la vitesse de transport, ce qui conduit à modifier q_s et q_g.

L'influence de la vitesse a été surtout étudiée pour les valeurs minimales. Bien entendu il est difficile de ne faire varier qu'un seul paramètre à la fois. En effet, pour un conduit donné si l'on réduit par exemple uniquement le débit-masse d'air q_g on modifie en même temps le débit-masse de particules q_s et la pression de fonctionnement c'est à dire la masse volumique de l'air ρ_g.

Il est donc nécessaire de procéder à un grand nombre d'expériences de façon à pouvoir grouper les essais les plus voisins qui ne diffèrent que par un seul paramètre. Puis en partant de l'équation :

$$(23) \quad C_D = \frac{4d(1-c)}{3\rho_g (U_g - U_s)^2} \left[g(\rho_s - \rho_g) - \frac{J}{1-c} \right]$$

on calcule les valeurs C_D pour chacun des diamètres des conduits.

On a établi la courbe $C_D = f(U_g)$ par la méthode des moindres carrés pour les résultats obtenus sur le conduit D = 50 mm et l'on a porté la courbe de même équation sur les points de coordonnées U_g, C_D, déterminés à partir des essais en conduits D = 32 mm et D = 80 mm. Ces courbes sont reprises sur les figures 9 - 10 - 11.

Avec l'équation :

$$(22) \quad \Lambda_{gv} = \frac{J}{1-c} \cdot \frac{2D}{\rho_g U_g^2}$$

on calcule les valeurs Λ_{gv}. On a établi pour chacun des conduits les courbes $\Lambda_{gv} = f(q)$ que l'on trouvera sur les figures 12 - 13 - 14.

On a procédé également à l'établissement des courbes $\frac{J}{\Delta p_g} = f(q)$ (voir figures 15 - 16 - 17).

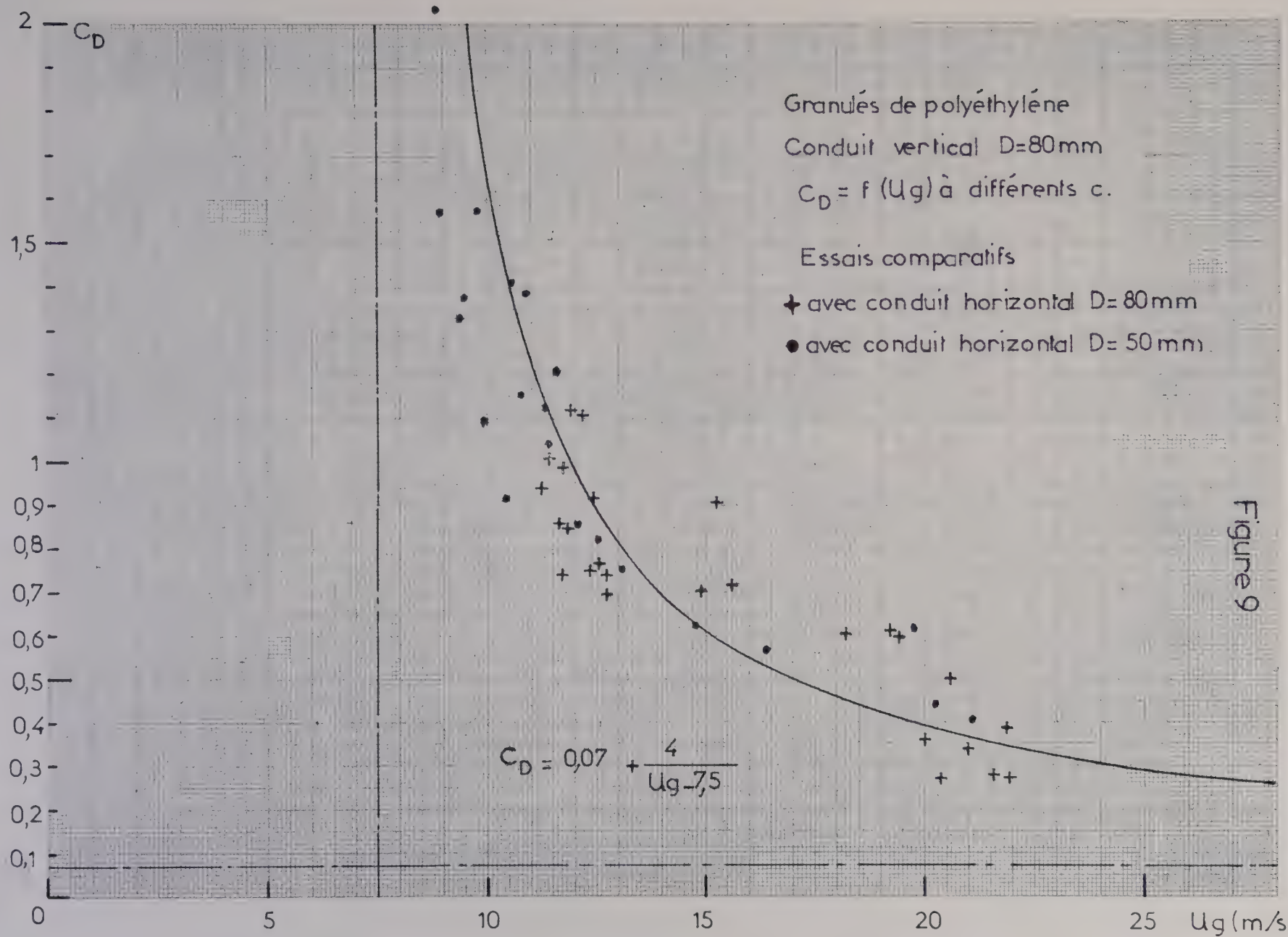

C_D
2
1,5
1
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
5
10
15
20
25
Ug (m/s)
Granulés de polyéthylène
Conduit vertical D=80mm
$C_D = f(Ug)$ à différents c.
Essais comparatifs
avec conduit horizontal D= 80mm
avec conduit horizontal D= 50mm
$C_D = 0{,}07 + \frac{4}{Ug - 7{,}5}$

Figure 9

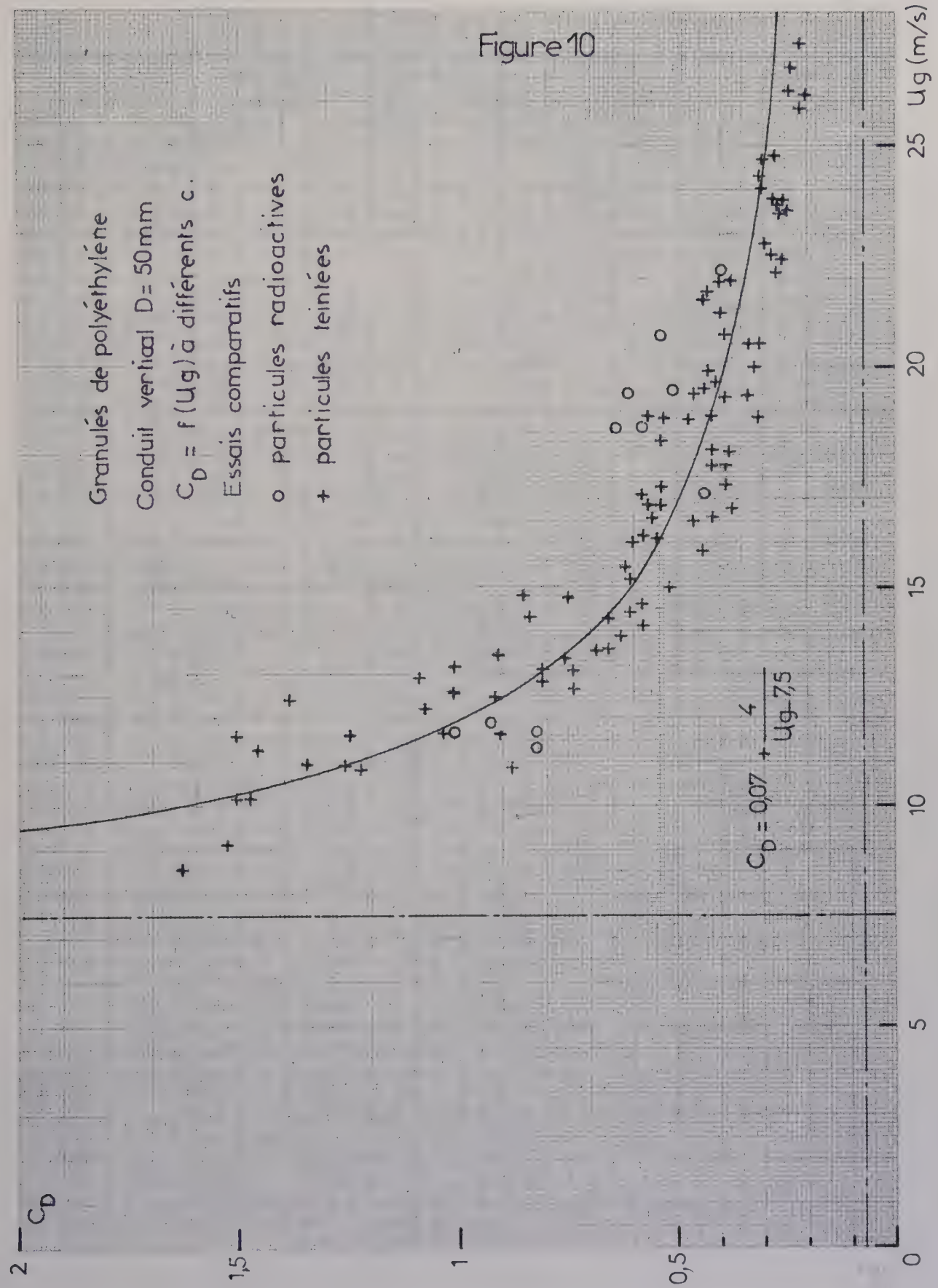


Figure 10
Granulés de polyéthylène
Conduit vertical D = 50 mm
$C_D = f(Ug)$ à différents c.
Essais comparatifs
o particules radioactives
+ particules teintées
$C_D = 0{,}07 + \frac{4}{Ug - 7{,}5}$
C_D
2
1,5
1
0,5
0
5
10
15
20
25
Ug (m/s)

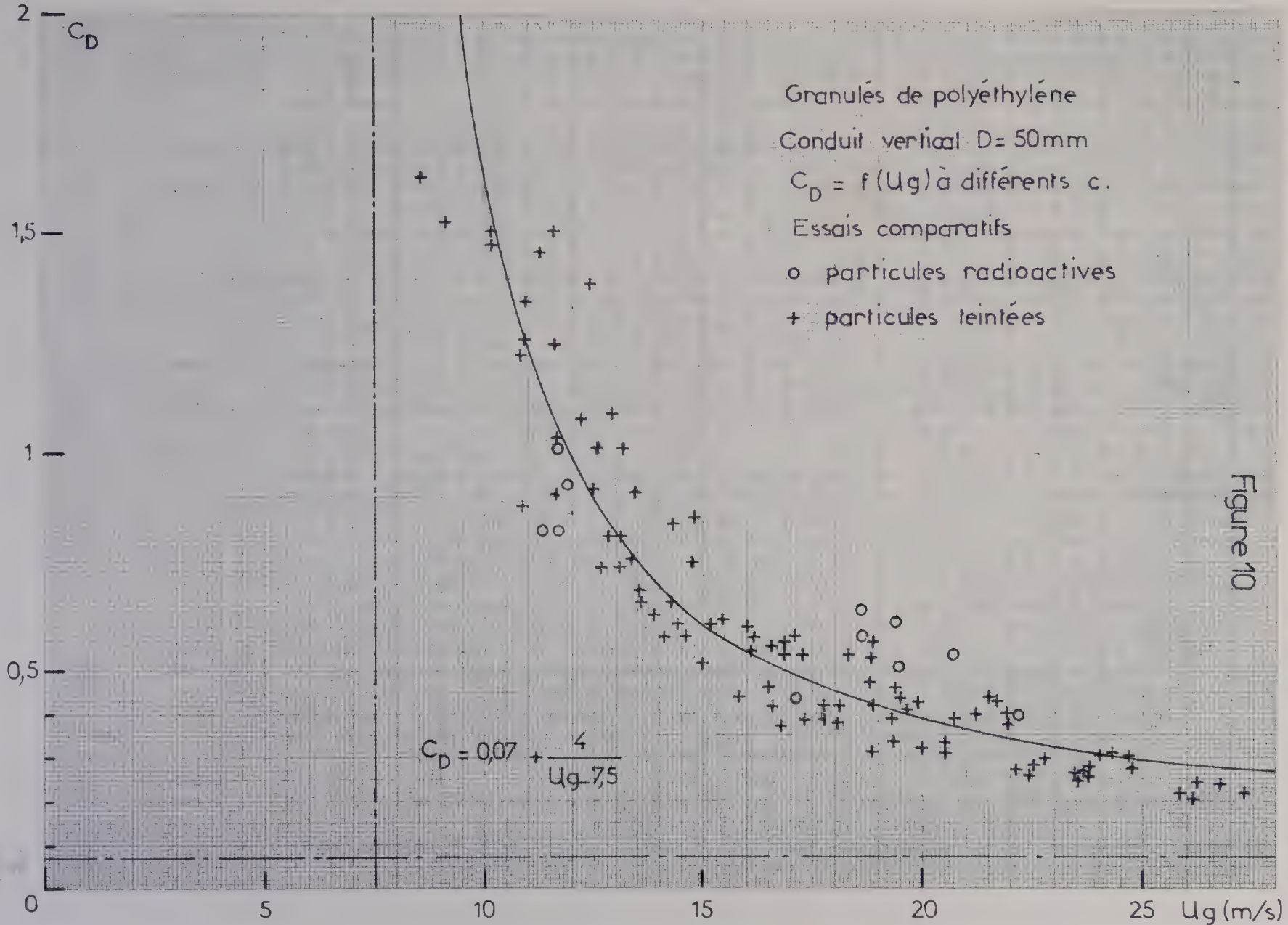

C_D
2
1,5
1
0,5
0
5
10
15
20
25
Ug (m/s)
Granulés de polyéthylène
Conduit vertical D= 50mm
$C_D = f(Ug)$ à différents c.
Essais comparatifs
o particules radioactives
+ particules teintées
$C_D = 0{,}07 + \frac{4}{Ug - 7{,}5}$

Figure 10

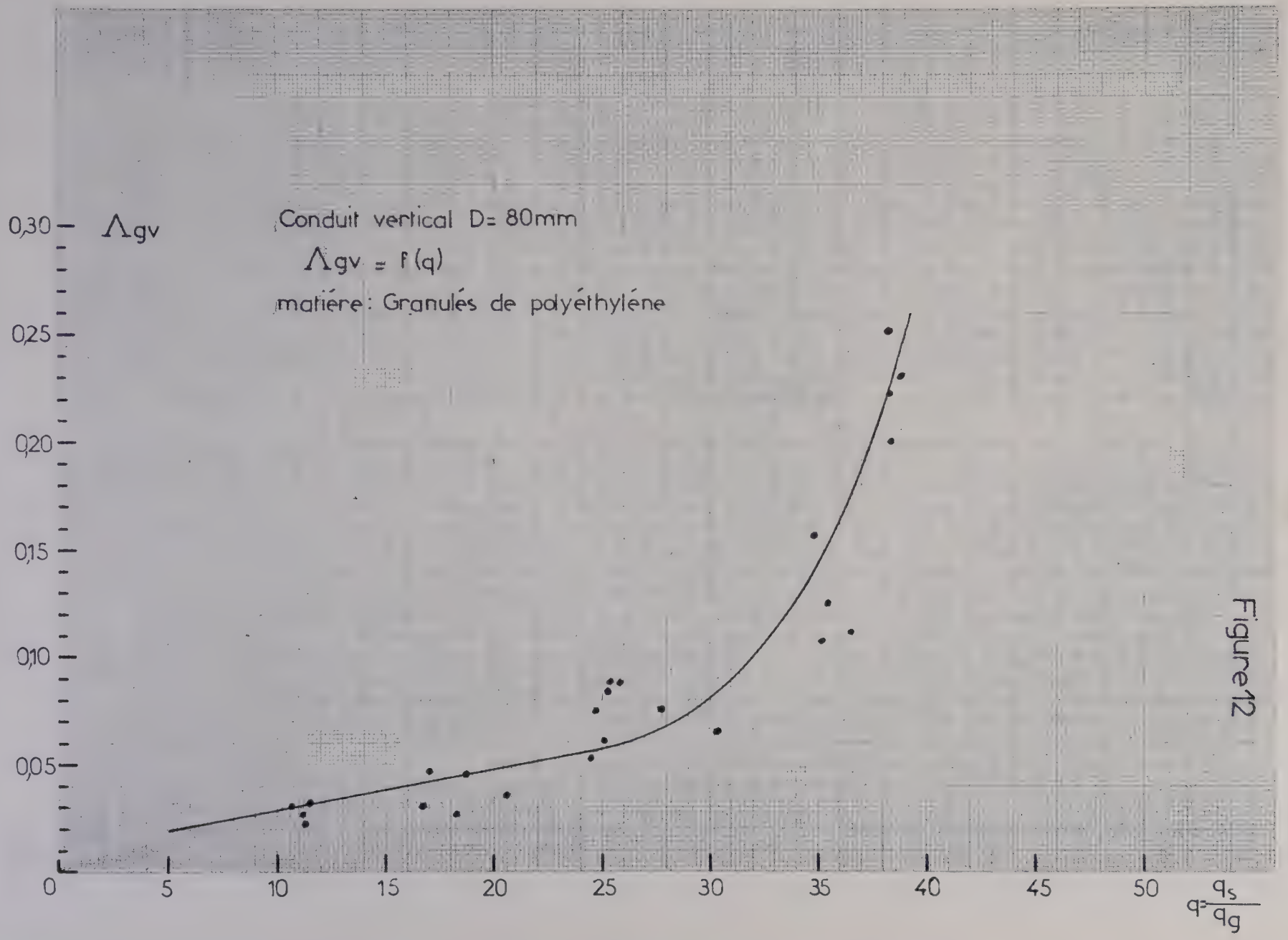

Conduit vertical D= 80mm
Λgv = f(q)
matière: Granulés de polyéthylène
Λgv
0,30
0,25
0,20
0,15
0,10
0,05
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
q = qs/qg

Figure 12

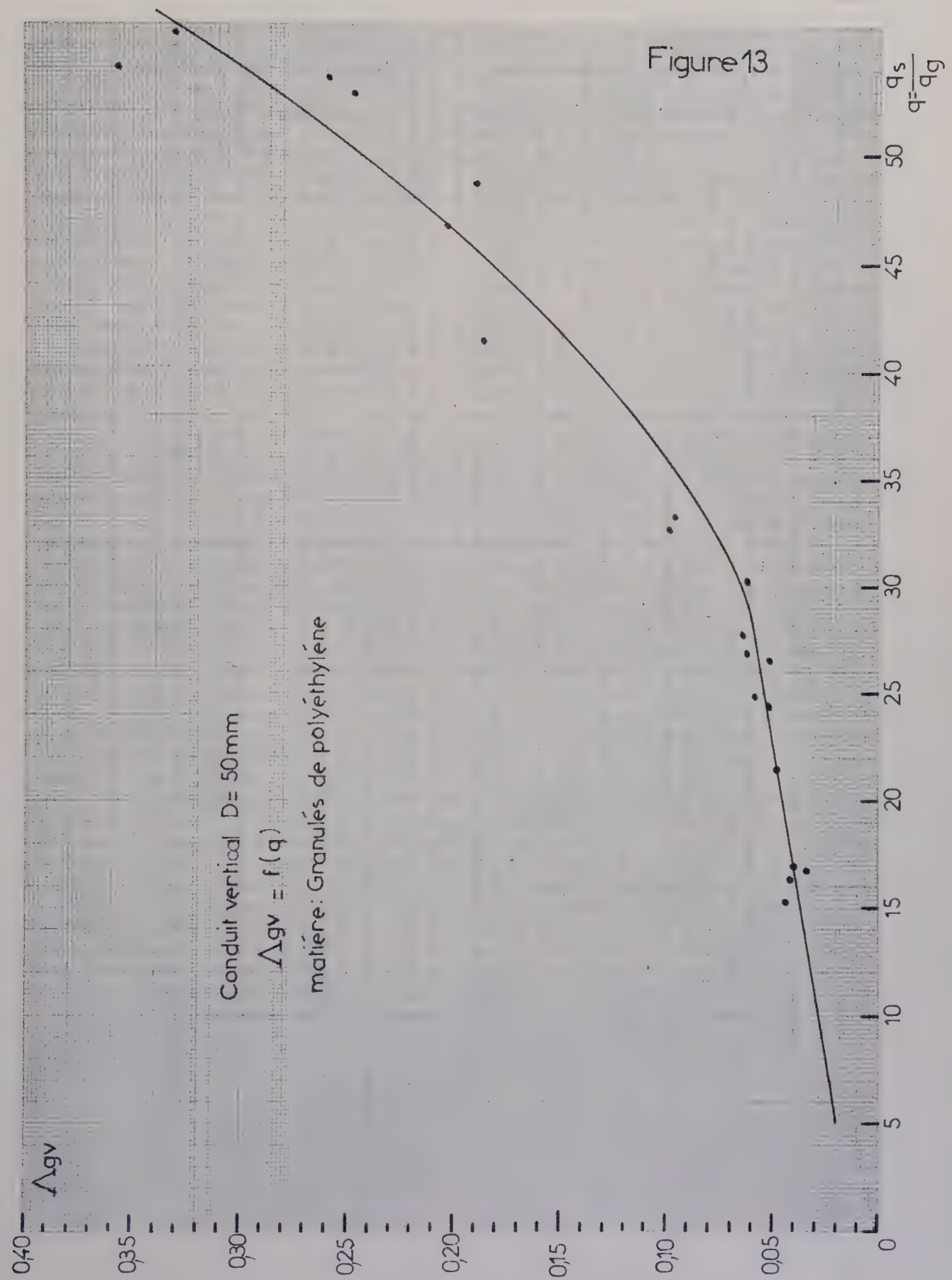

Δgv
0,40
0,35
0,30
0,25
0,20
0,15
0,10
0,05
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
q=qs/qg
Conduit vertical D= 50mm
Δgv = f(q)
matière: Granulés de polyéthylène

Figure 13

Conduit vertical D= 32 mm

$\Lambda gv = f(q)$

matiére: granulés de polyéthyléne

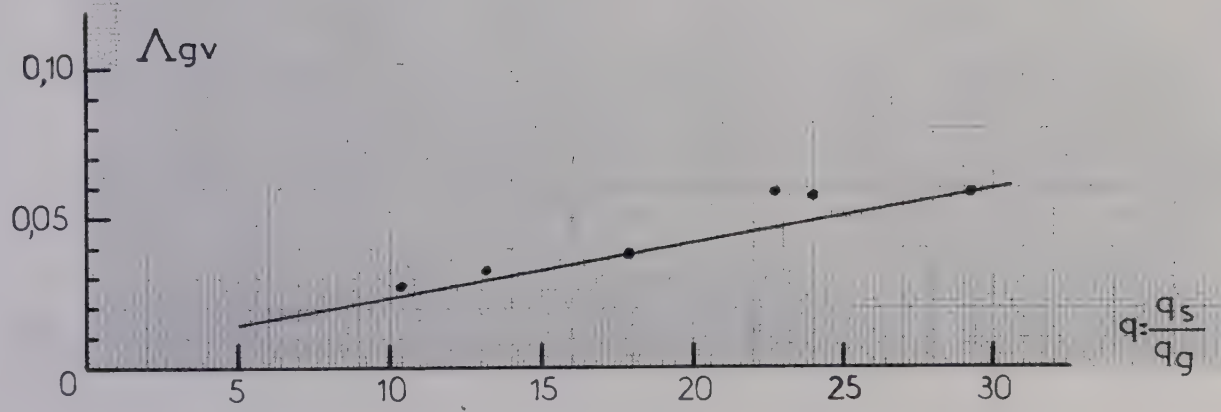


Figure 14

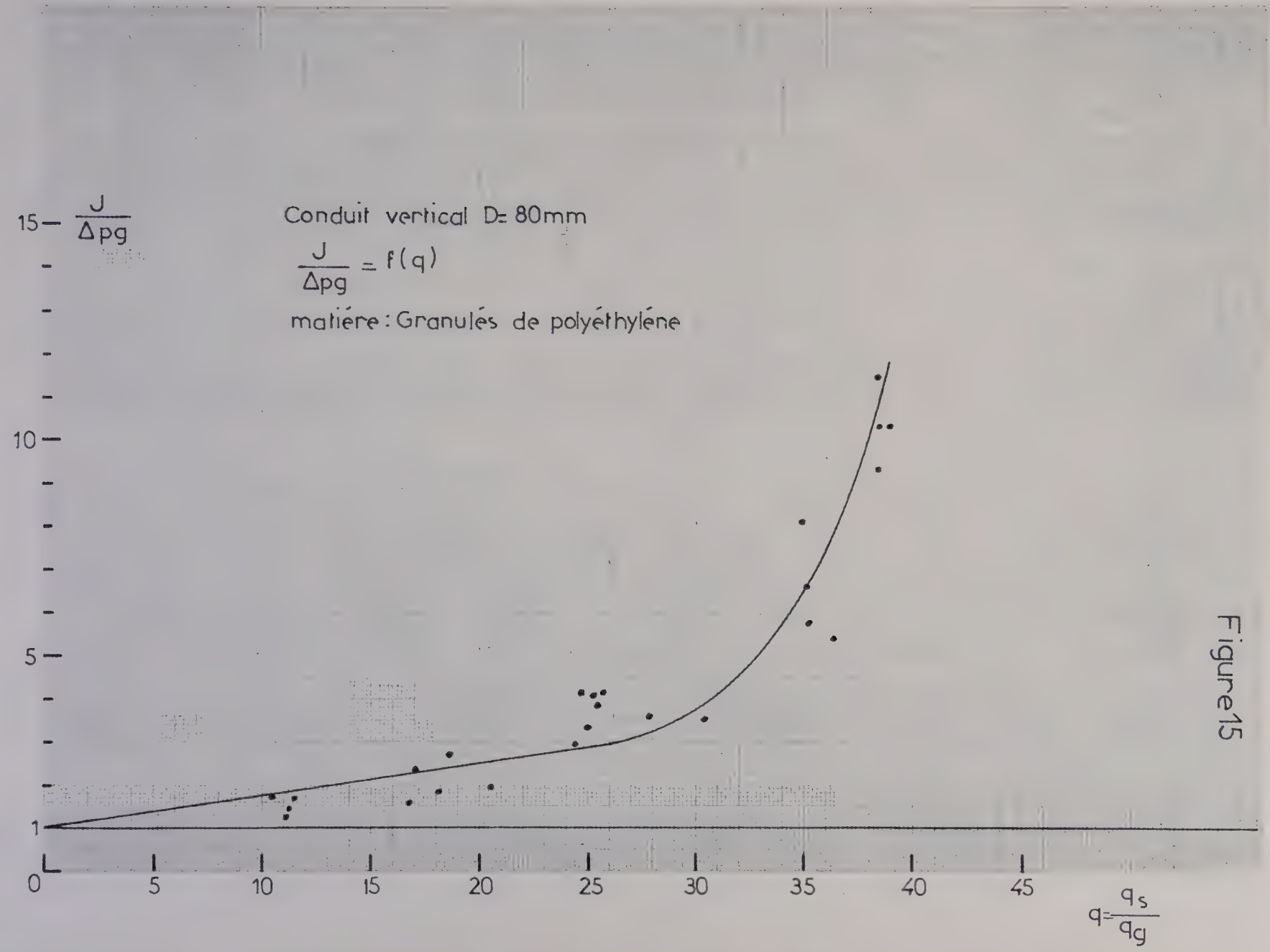

Conduit vertical D= 80mm
J/Δpg = f(q)
matiére : Granulés de polyéthyléne
J/Δpg
15
10
5
1
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
q = qs/qg

Figure15

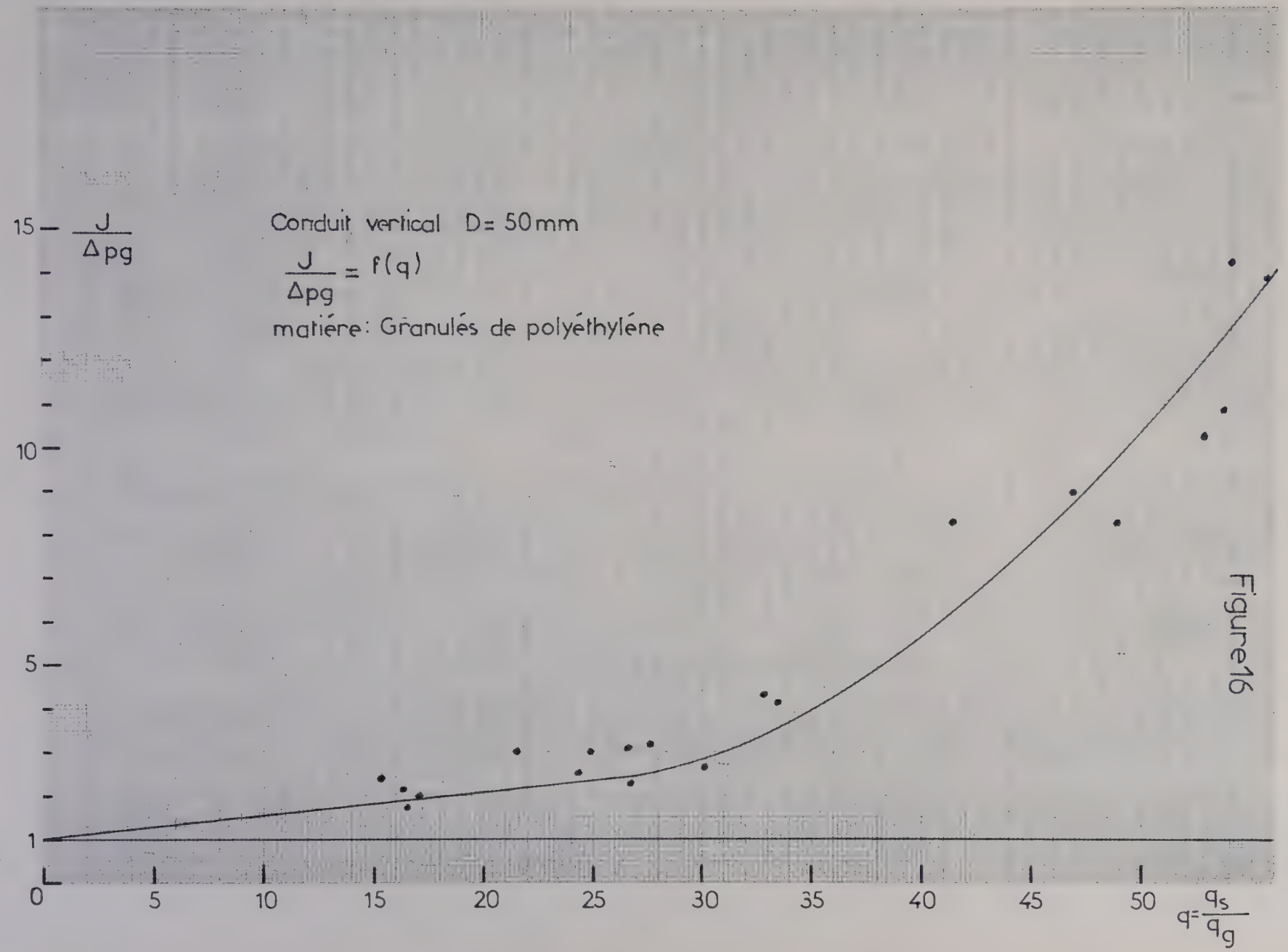

Conduit vertical D= 50mm
J/Δpg = f(q)
matière: Granulés de polyéthylène
J/Δpg
15
10
5
1
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
q=qs/qg

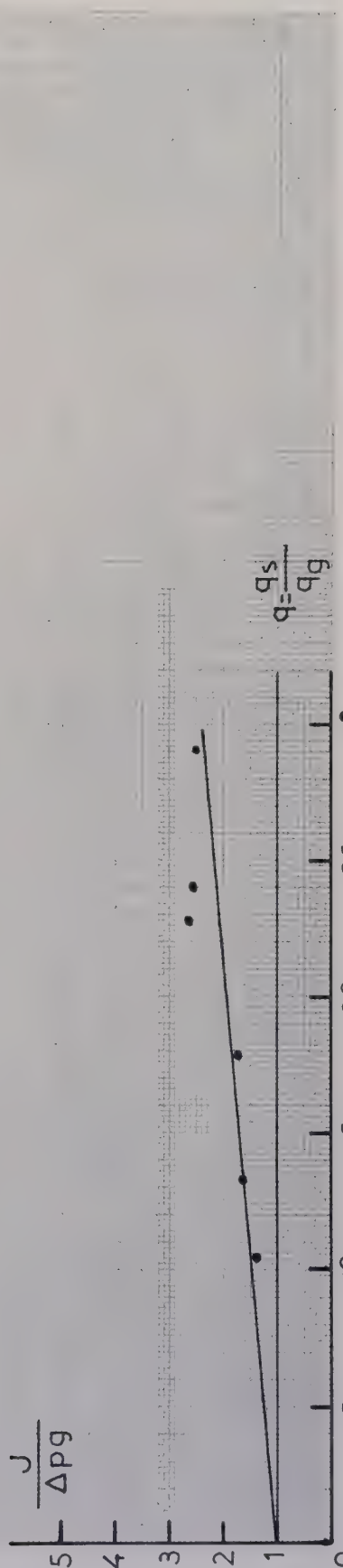
Figure16

Figure17

Conduit vertical D= 32 mm

$\frac{J}{\Delta pg} = f(q)$

matière : granulés de polyéthylène



412 - Résultats obtenus avec le blé.

Caractéristiques physiques des particules.

Comme pour les granulés de polyéthylène on a déterminé un diamètre moyen équivalent des particules de blé en prenant le diamètre de la sphère ayant même volume.

Il faut noter toutefois que la forme du grain de blé est plutôt allongée alors que le granulé de polyéthylène est plutôt cylindrique avec une longueur de génératrice voisine du diamètre.

- diamètre moyen équivalent d'un grain de blé : d = 4,06 mm
- masse volumique : ρ_s = 1,27 g/cm^3

Comme pour les granulés de polyéthylène nous avons établi les courbes suivantes :

$C_D = f(U_g)$ figures 18 - 19 - 20 pour D = 80 - 50 et 32 mm

$\Lambda_{gv} = f(q)$ figures 21 - 22 - 23 pour D = 80 - 50 et 32 mm

$\frac{J}{\Delta_{pg}} = f(q)$ figures 24 - 25 - 26 pour D = 80 - 50 et 32 mm

Remarques

Nous n'avons porté sur les figures que les points pour lesquels nous avons pu relever les Δp, c'est à dire lorsque les fluctuations de pression n'étaient pas trop importantes.

Par ailleurs, nous n'avons pas pu couvrir, pour les granulés de polyéthylène et le blé, la zone des faibles concentrations de transport q, surtout en conduit D = 32 mm.

En effet la section de l'orifice d'écoulement de la matière dans la pièce de mise en vitesse devient petite par rapport aux dimensions des particules et l'on aboutit à des irrégularités très importantes du débit q_s.

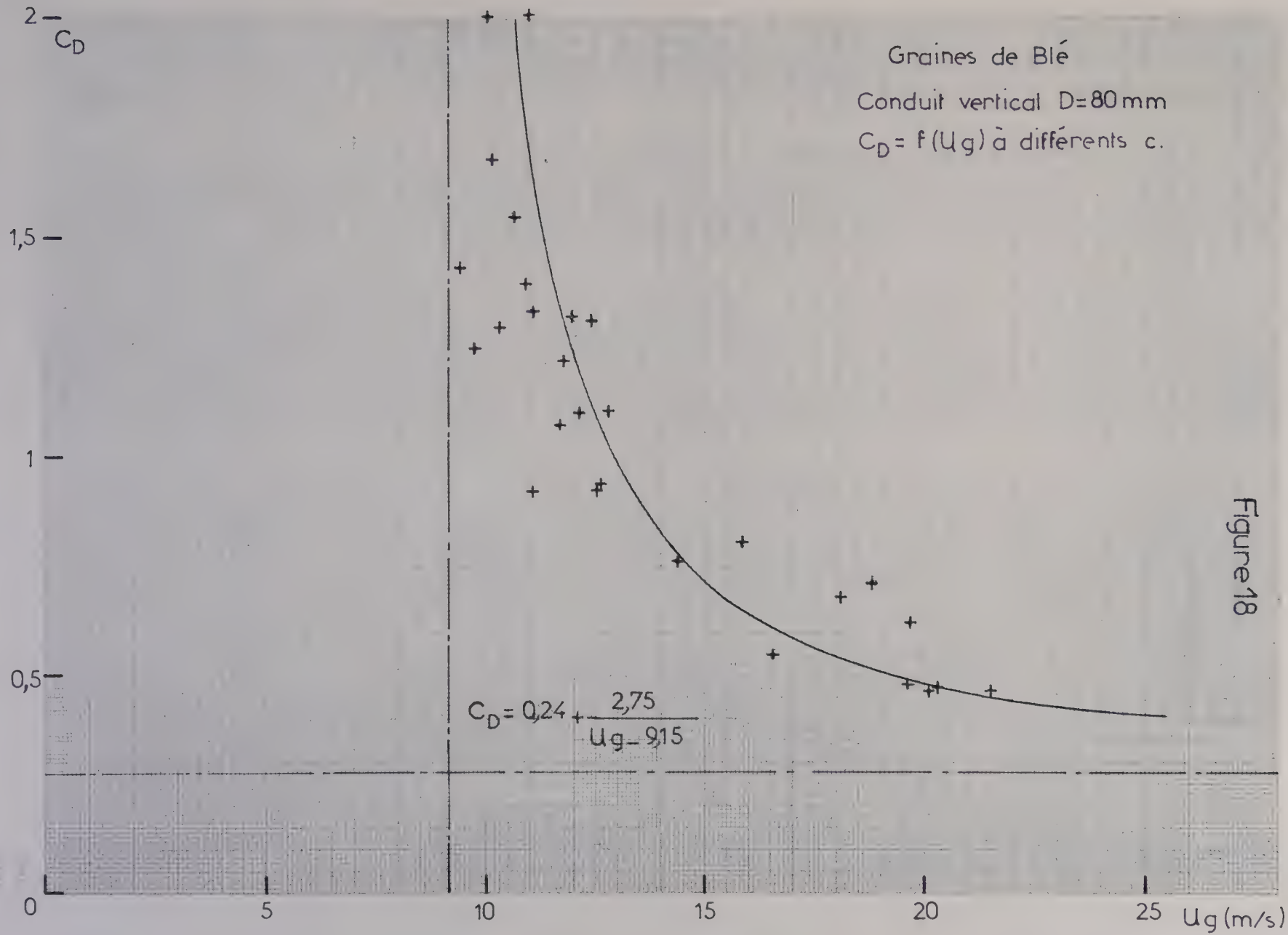

Graines de Blé
Conduit vertical D=80mm
$C_D = f(Ug)$ à différents c.
C_D
2
1,5
1
0,5
0
5
10
15
20
25
Ug (m/s)
$C_D = 0{,}24 + \frac{2{,}75}{Ug - 9{,}15}$

Figure 18

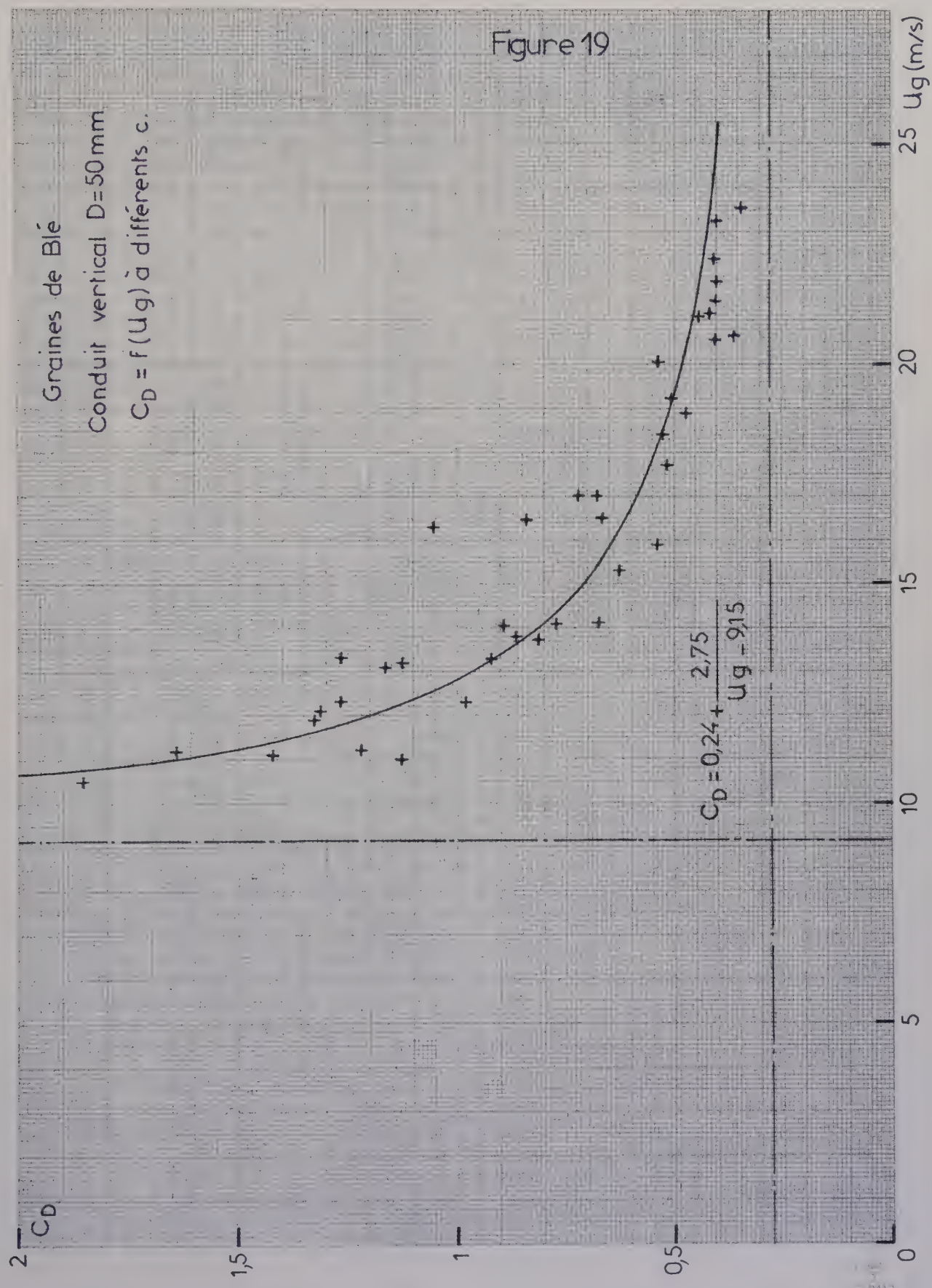


Figure 19
Graines de Blé
Conduit vertical D=50 mm
$C_D = f(Ug)$ à différents c.
C_D
2
1,5
1
0,5
0
5
10
15
20
25
Ug (m/s)
$C_D = 0,24 + \frac{2,75}{Ug - 9,15}$

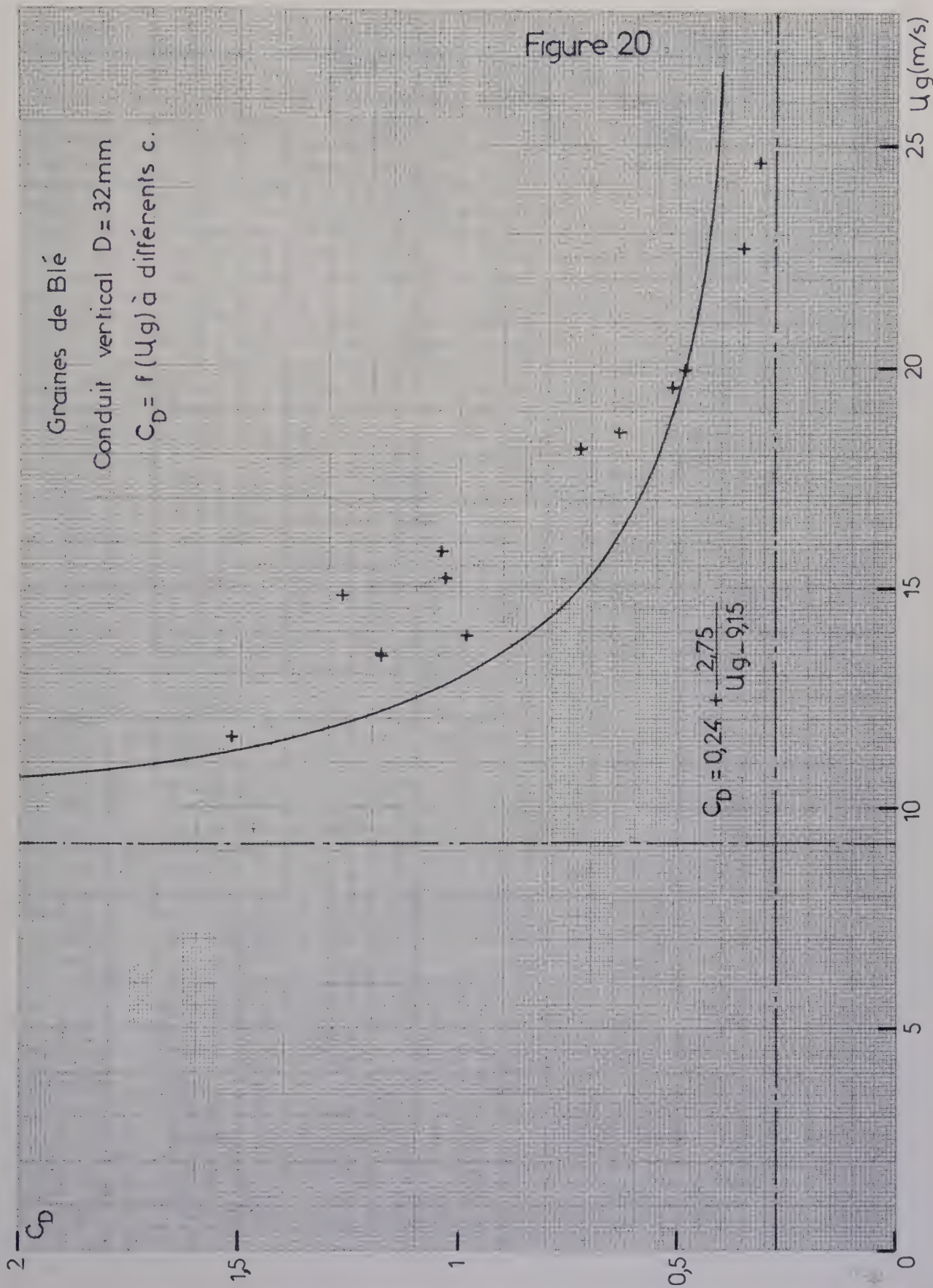

Graines de Blé
Conduit vertical D=32mm
$C_D = f(U_g)$ à différents c.
$C_D = 0,24 + \frac{2,75}{U_g - 9,15}$
C_D
2
1,5
1
0,5
0
5
10
15
20
25
U_g(m/s)

Figure 20

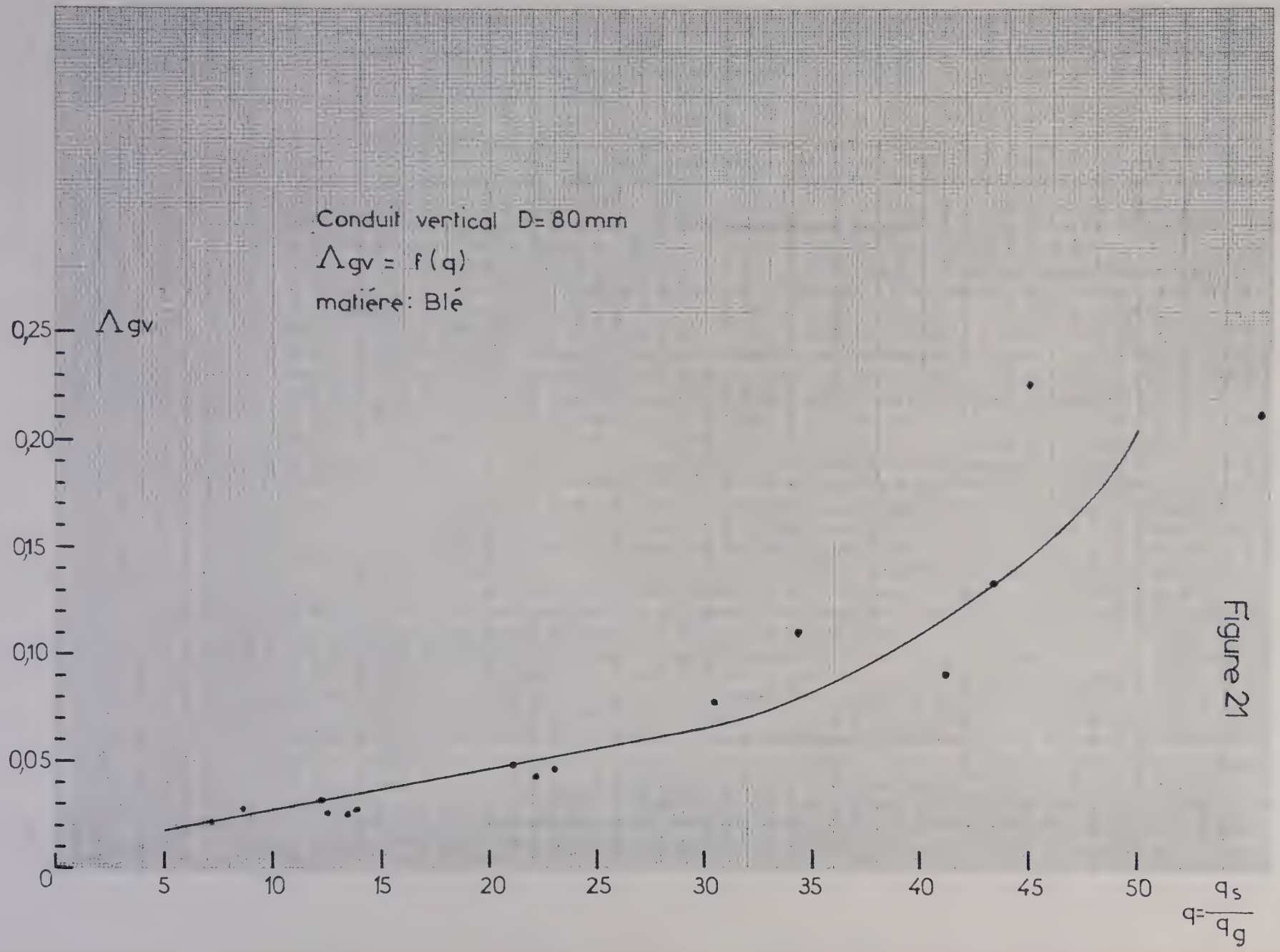

Conduit vertical D= 80 mm
Λgv = f(q)
matière: Blé
Λgv
0,25
0,20
0,15
0,10
0,05
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
q = qs / qg

Figure 21

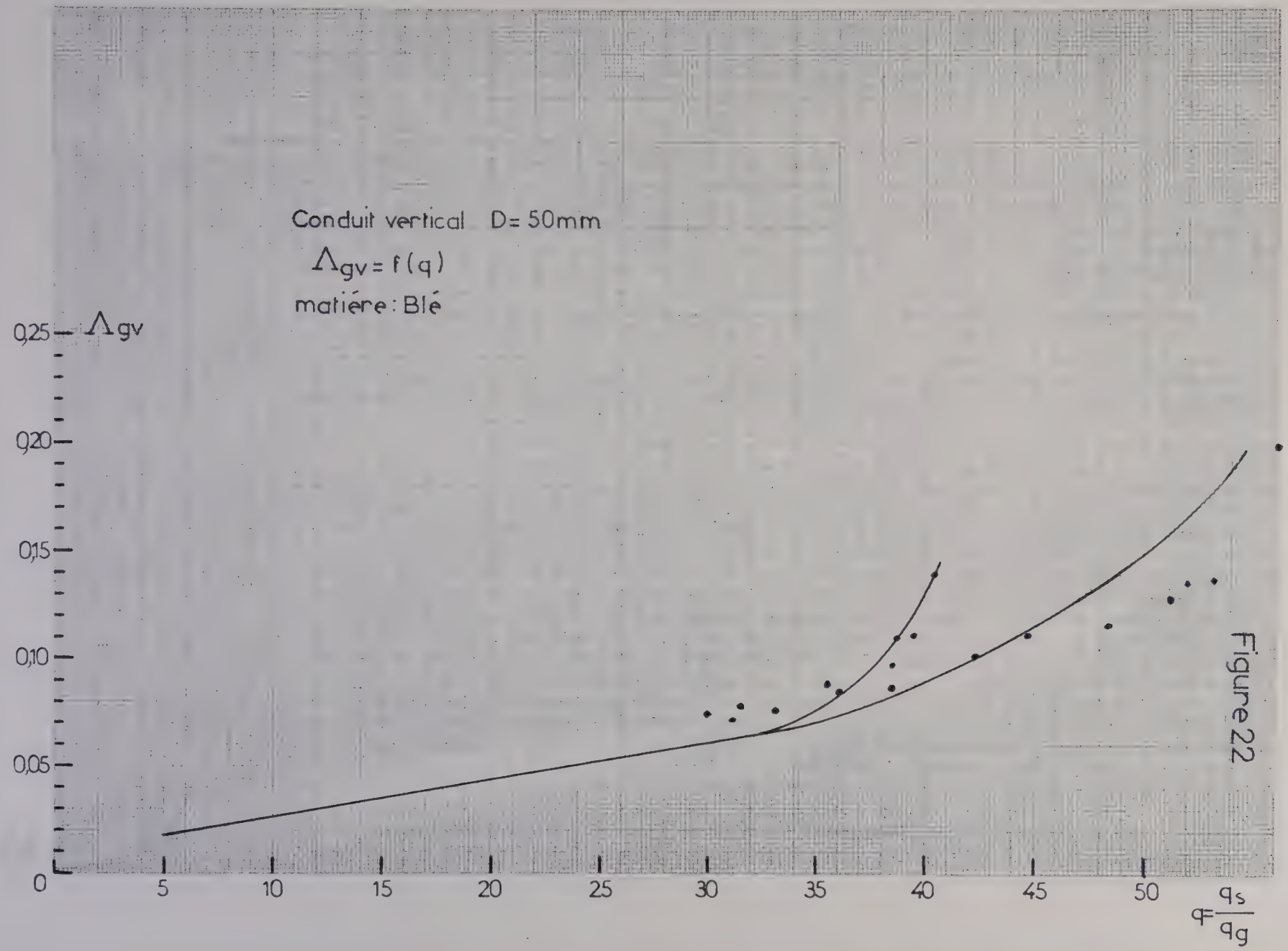
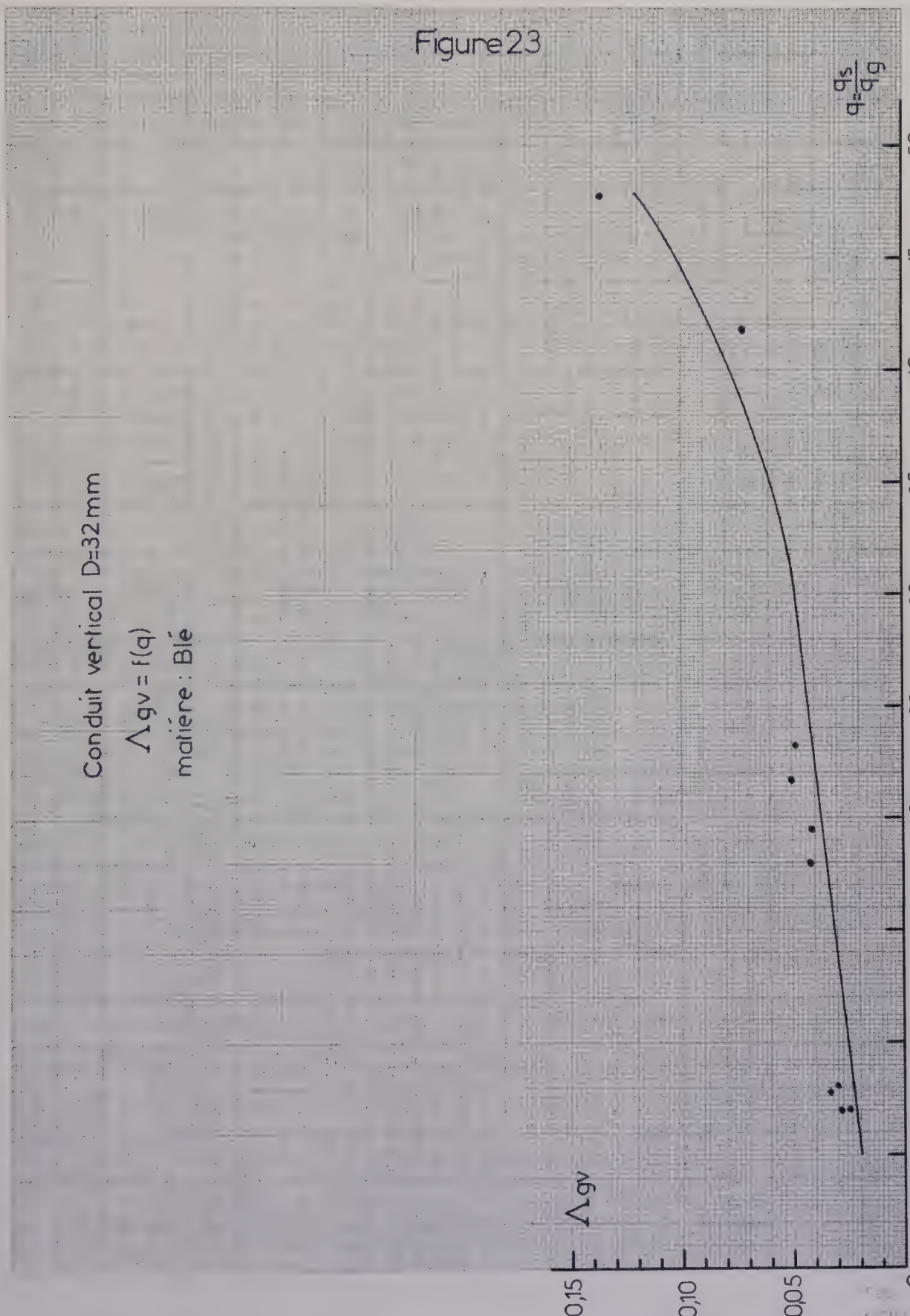

Conduit vertical D= 50mm
$\Lambda_{gv} = f(q)$
matiére : Blé
Λ_{gv}
0,25
0,20
0,15
0,10
0,05
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
$q = \frac{q_s}{q_g}$

Figure 22

Figure 23


Conduit vertical D=32 mm
Λgv = f(q)
matière : Blé
Λgv
0,15
0,10
0,05
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
q=qs/qg

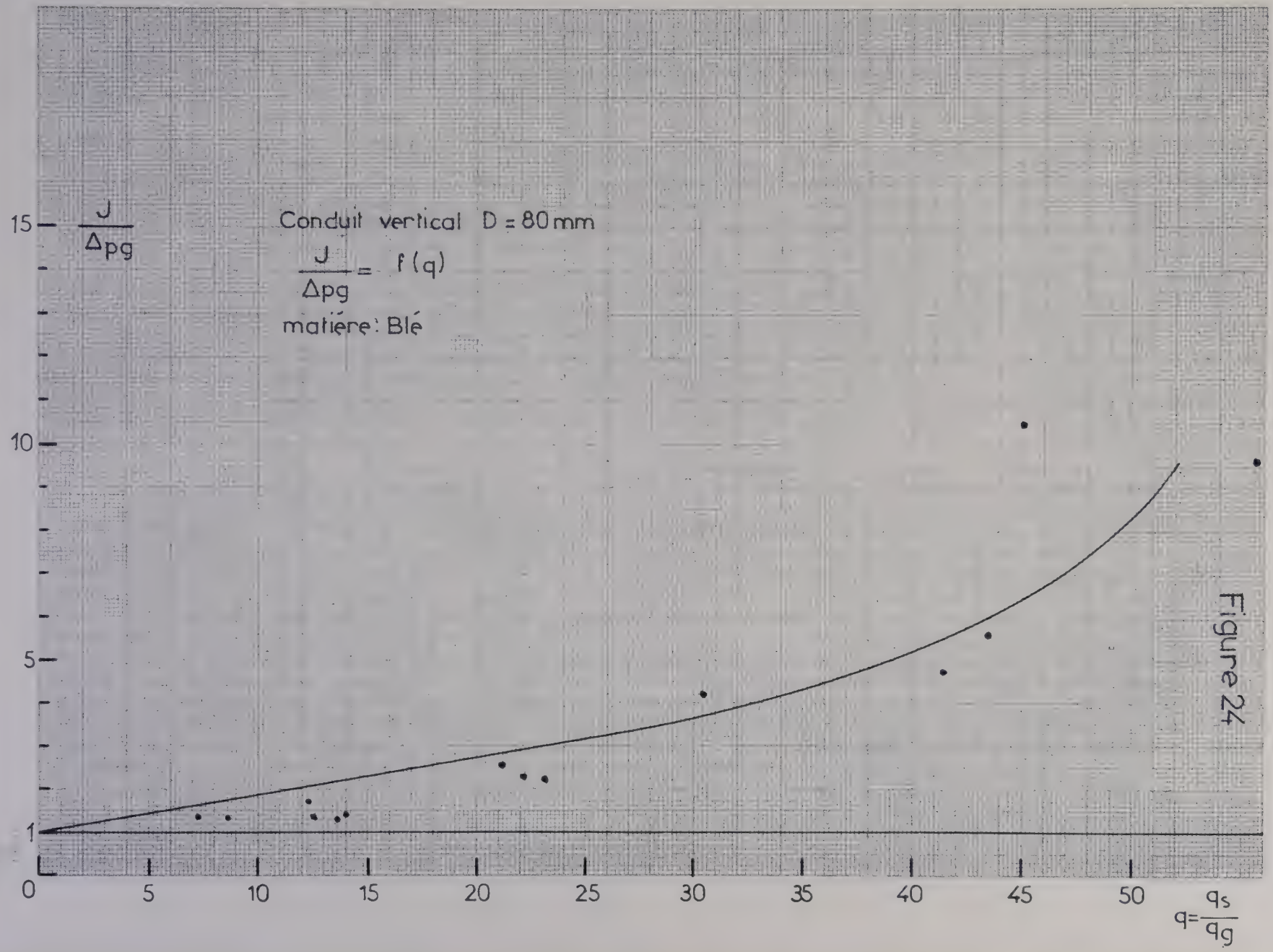

Conduit vertical D = 80 mm
J/Δpg = f(q)
matière: Blé
J/Δpg
15
10
5
1
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
q = qs/qg

Figure 24

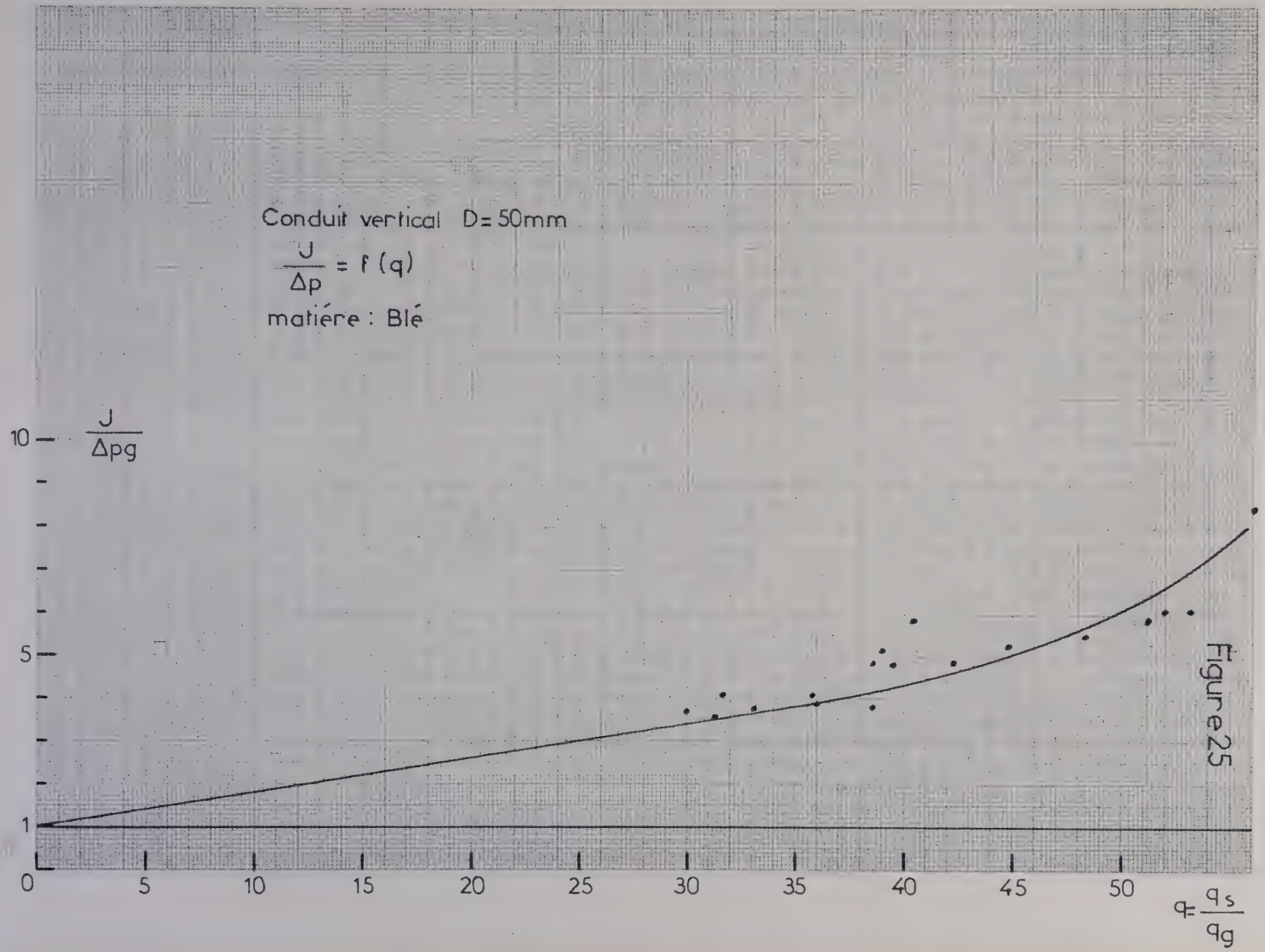

Conduit vertical D= 50mm
J/Δp = f (q)
matiére : Blé
J/Δpg
10
5
1
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
q = qs/qg

Figure 25

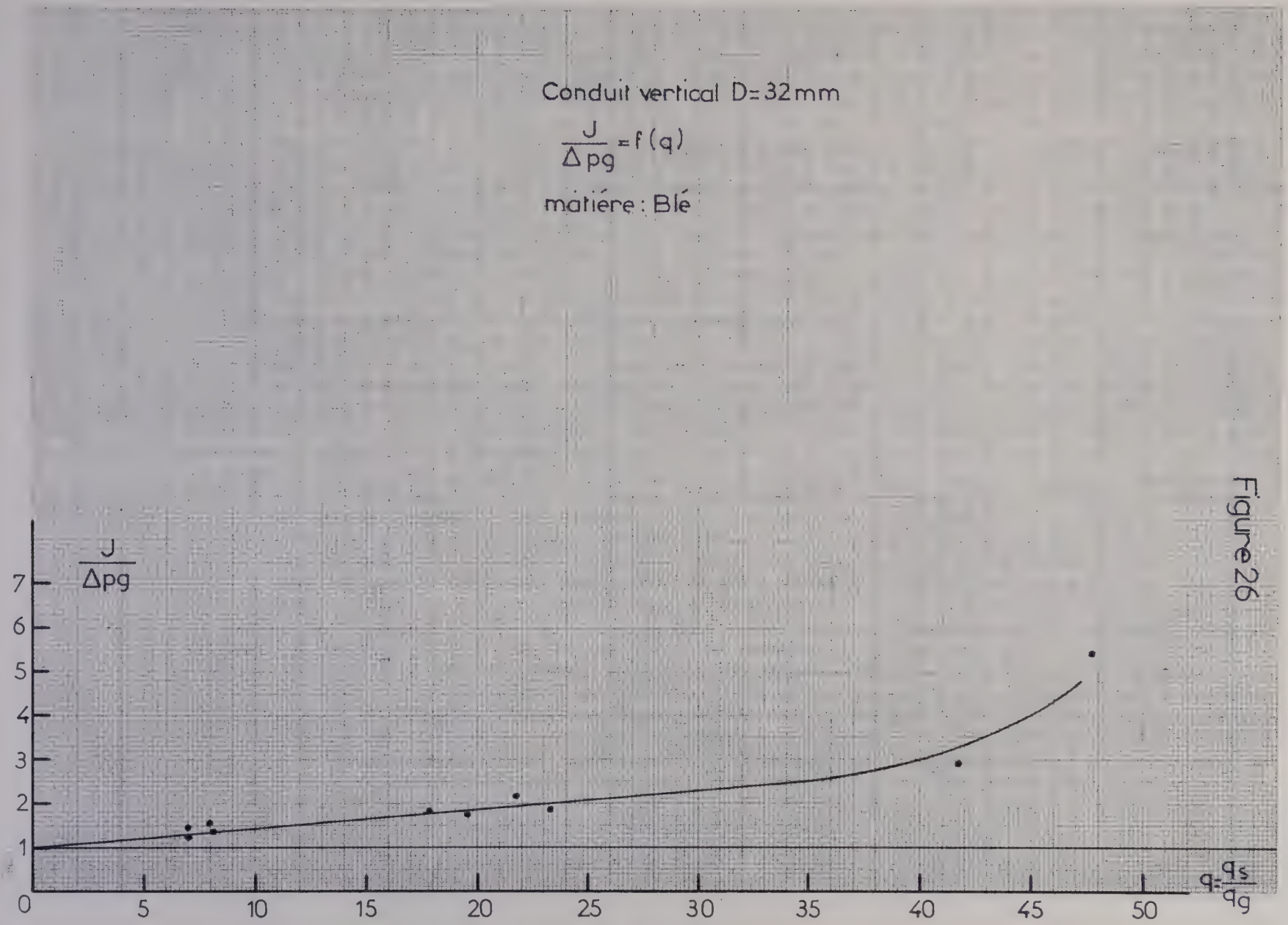

Conduit vertical D=32mm
J/Δpg = f(q)
matière : Blé
J/Δpg
7
6
5
4
3
2
1
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
q=qs/qg

Figure 26

42 - ESSAIS AVEC LES PRODUITS PULVERULENTS

Pour les produits pulvérulents il n'est plus possible d'utiliser le système de prises de vues comme pour les produits granuleux.

Aussi il a été procédé à la mesure de la concentration spatiale moyenne c dans une section droite du conduit, mesure basée, comme indiqué dans la troisième partie, paragraphe 3242, sur l'atténuation du rayonnement émis par une source scellée de rayons β .

Pour déterminer c au moyen de ce dispositif nous avons choisi le produit ayant la masse volumique la plus élevée, c'est à dire le sable, et le conduit de transport de 80 mm de diamètre.

421 - Résultats obtenus avec le sable

Caractéristiques physiques des particules
- diamètre moyen : d = 0,105 mm
- masse volumique : ρ_s = 2,58 g/cm^3

Les essais, comme pour les produits granuleux, ont été effectués en faisant varier q_s et q_g et en particulier vers les basses vitesses de transport.

Lors de chaque essai on mesure q_s, q_g, Δp et la concentration spatiale moyenne c.

L'information fournie par le détecteur est affichée sur un compteur totalisant les impulsions reçues pendant un temps déterminé (1, 10, 100 ou 1000 secondes). Elle est également enregistrée en continu.

Une courbe d'étalonnage (figure 27) permet de déterminer la concentration spatiale c soit à partir des indications du compteur, soit à partir de l'enregistrement.

Pour des raisons de précision il a été jugé préférable d'utiliser pour les dépouillements les indications fournies par le compteur en prenant comme base de temps 100 secondes, ce qui permettait d'obtenir plusieurs valeurs pour un même essai et d'en faire la moyenne. L'enregistrement permet de suivre les variations instantanées de la concentration moyenne et de vérifier que les fluctuations ne sont pas trop importantes. Nous avons reproduit un enregistrement sur la figure 28, pour une concentration moyenne de transport q = 28,8

On constate qu'en prenant la moyenne des écarts des valeurs maximales et minimales des concentrations enregistrées au cours d'un même essai, on trouve pratiquement le même résultat que celui obtenu par le comptage du nombre de chocs.

Connaissant la concentration spatiale moyenne c on en déduit les vitesses U_s et U_g à partir des équations (3)' et (4)' :

$$U_s = \frac{q_s}{c\,S\,\rho_s} \quad \text{et} \quad U_g = \frac{q_g}{(1-c)\,S\,\rho_g}$$

Compte tenu des résultats obtenus dans le conduit D = 80 mm pour les valeurs de U_s déterminées à partir de la mesure de c avec les rayons /3 nous avons admis de prendre pour les essais effectués dans les conduits D = 50 et 32 mm, la vitesse de chute w de la particule dans le fluide considéré comme immobile. L'analyse des résultats dans la cinquième partie montre en effet qu'il est possible d'admettre cette hypothèse sans qu'elle entraine une erreur importante.

Si on admet que $U_g - U_s = w$, on a :

$$w^2 = \frac{4d}{3C_D}\,\frac{g(\rho_s-\rho_g)}{\rho_g}$$

C_D est le coefficient de traînée des particules pour le nombre de Reynolds $\mathcal{R}_s = \rho_g \frac{w d}{\mu_g}$

Pour $0 < \mathcal{R}_s < 500$, $C_D = 18{,}5\,\mathcal{R}_s^{-0{,}6}$

On en déduit :

$$c = \frac{1}{1+\frac{\rho_g(U_g-w)}{\rho_s U_g g}} = \frac{1}{1+\frac{\rho_s}{\rho_g g}\left(1-\frac{w}{U_g}\right)}$$

U_g étant défini par

$$\rho_g U_g (1-c) S = q_g \quad \text{et} \quad V_g = \frac{q_g}{S\rho_g}$$

Posons $\frac{\rho_s}{\rho_g q} = m$, on obtient :

$$\rho_g U_g \frac{m\left(1-\frac{w}{U_g}\right)}{1+m\left(1-\frac{w}{U_g}\right)} \cdot S = q_g$$

d'où

$$m U_g^2 - U_g [m w + (1+m) V_g] + m w V_g = 0$$

Divisons par w^2 et posons $\frac{U_g}{w} = Y$ et $\frac{V_g}{w} = n$

$$Y^2 - Y\left[1+\left(\frac{1+m}{m}\right)n\right] + n = 0$$

et

$$Y = \frac{\left[1+\left(\frac{1+m}{m}\right)n\right] \pm \sqrt{\left[1+\left(\frac{1+m}{m}\right)n\right]^2 - 4n}}{2}$$

$\frac{\rho_s}{\rho_g}$ étant de l'ordre de 1000 et q pouvant atteindre des valeurs de l'ordre de 100, m est grand devant 1. La seule racine valable est la racine supérieure à n, c'est à dire la plus grande des 2 racines.

$$Y = \frac{\left[1+\left(\frac{1+m}{m}\right)n\right] + \sqrt{\left[1+\left(\frac{1+m}{m}\right)n\right]^2 - 4n}}{2}$$

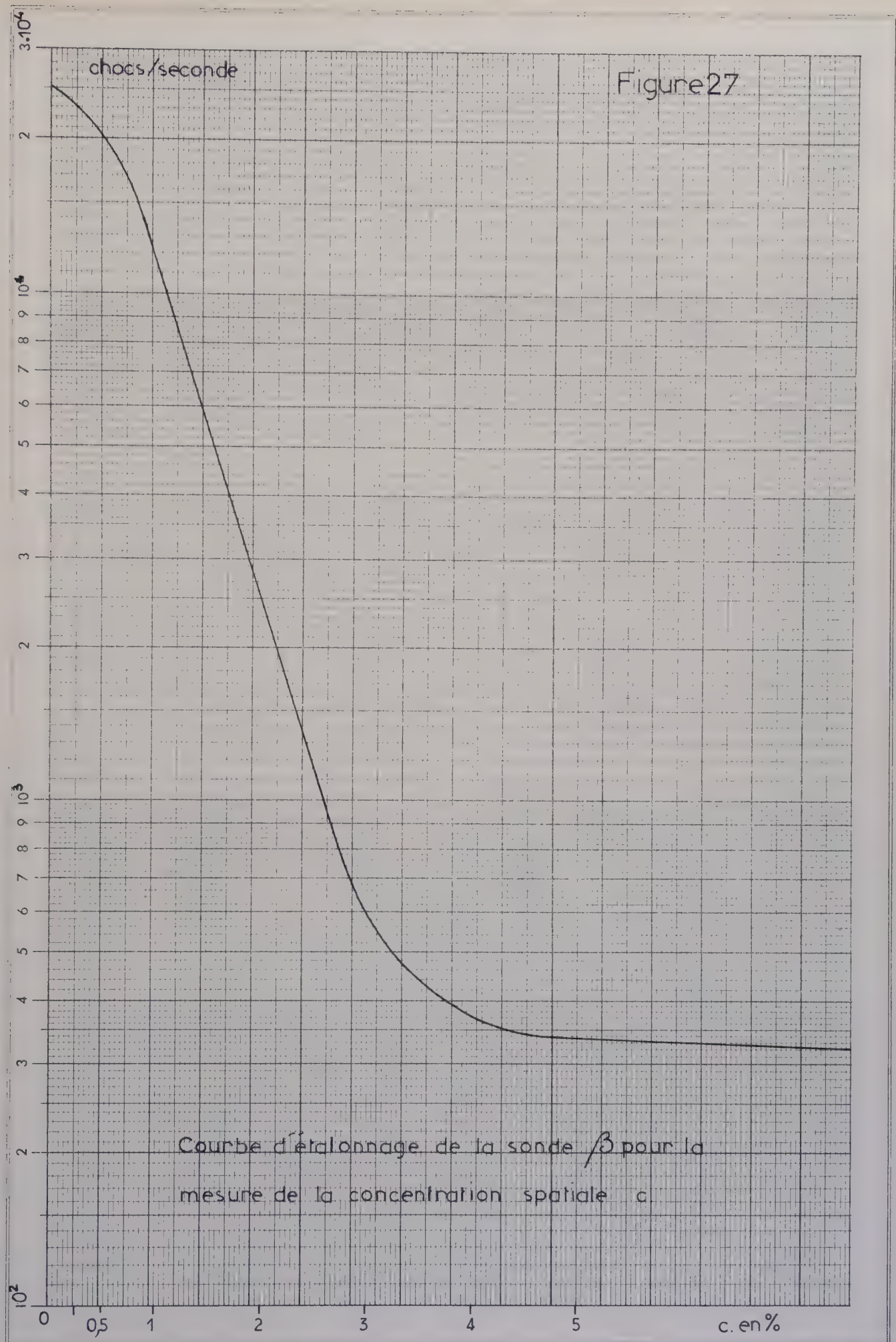
Pour la particule de sable on trouve w = 0,61 m/s.

Connaissant U_g on en déduit c.

Puis, comme pour les produits granuleux, nous avons établi les courbes suivantes :

$\Lambda_{gv} = f(q)$ figure 29 pour conduit D = 80 mm à partir de la concentration c mesurée et figures 30 - 31 pour D = 50 et 32 mm à partir de la vitesse de chute w calculée.

et $\frac{J}{\Delta p_g} = f(q)$ figures 32 - 33 - 34 pour D = 80 - 50 et 32 mm



Courbe d'étalonnage de la sonde β pour la mesure de la concentration spatiale c

PARIS 1V 280 G/C6

Figure 28

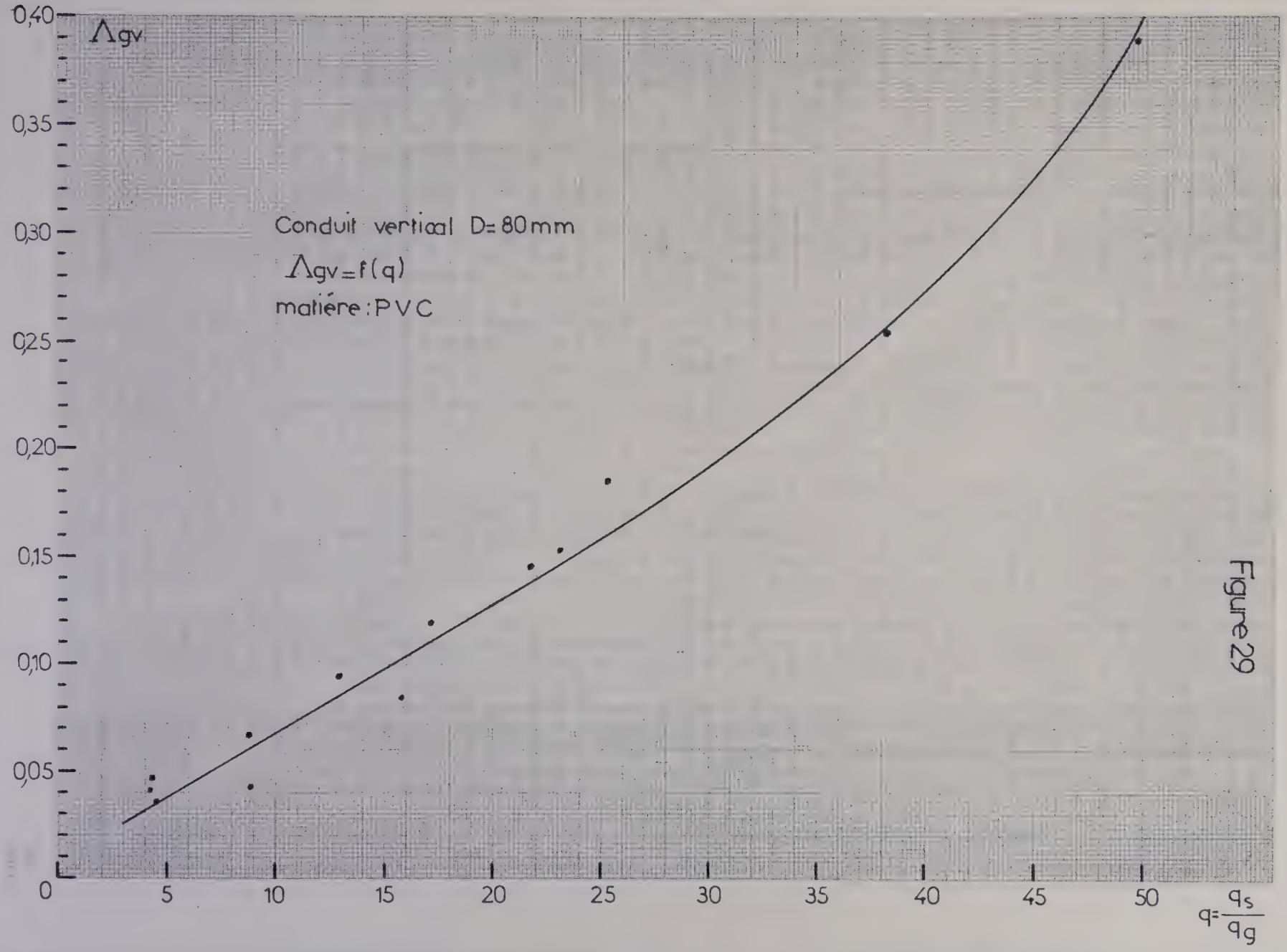

0,40
Λgv
0,35
Conduit vertical D= 80 mm
Λgv = f(q)
matière : PVC
0,30
0,25
0,20
0,15
0,10
0,05
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
q = qs/qg

Figure 29

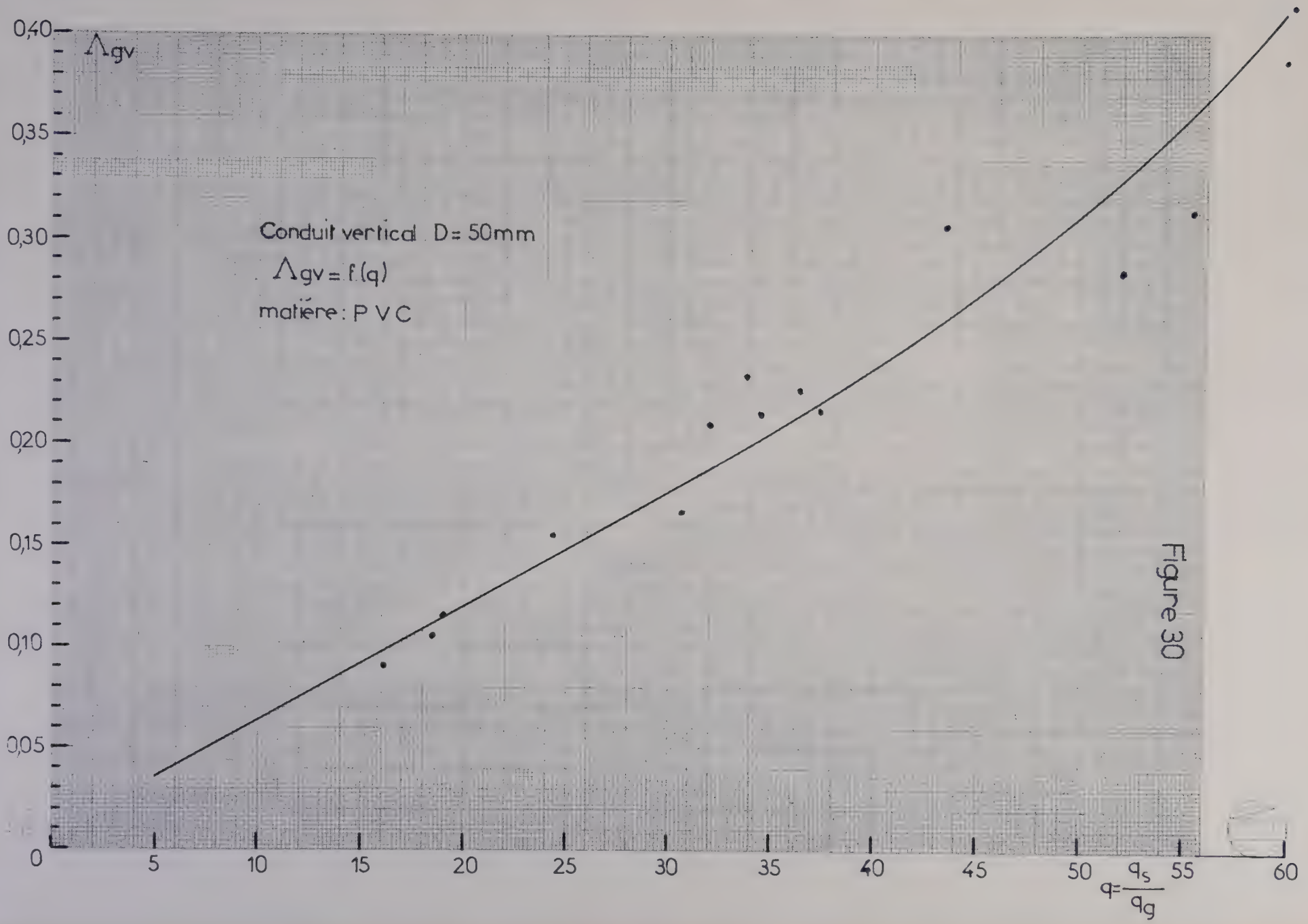

0,40
0,35
0,30
0,25
0,20
0,15
0,10
0,05
0
Λgv
Conduit vertical D= 50mm
Λgv = f(q)
matière: P V C
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
q= qs/qg

Figure 30

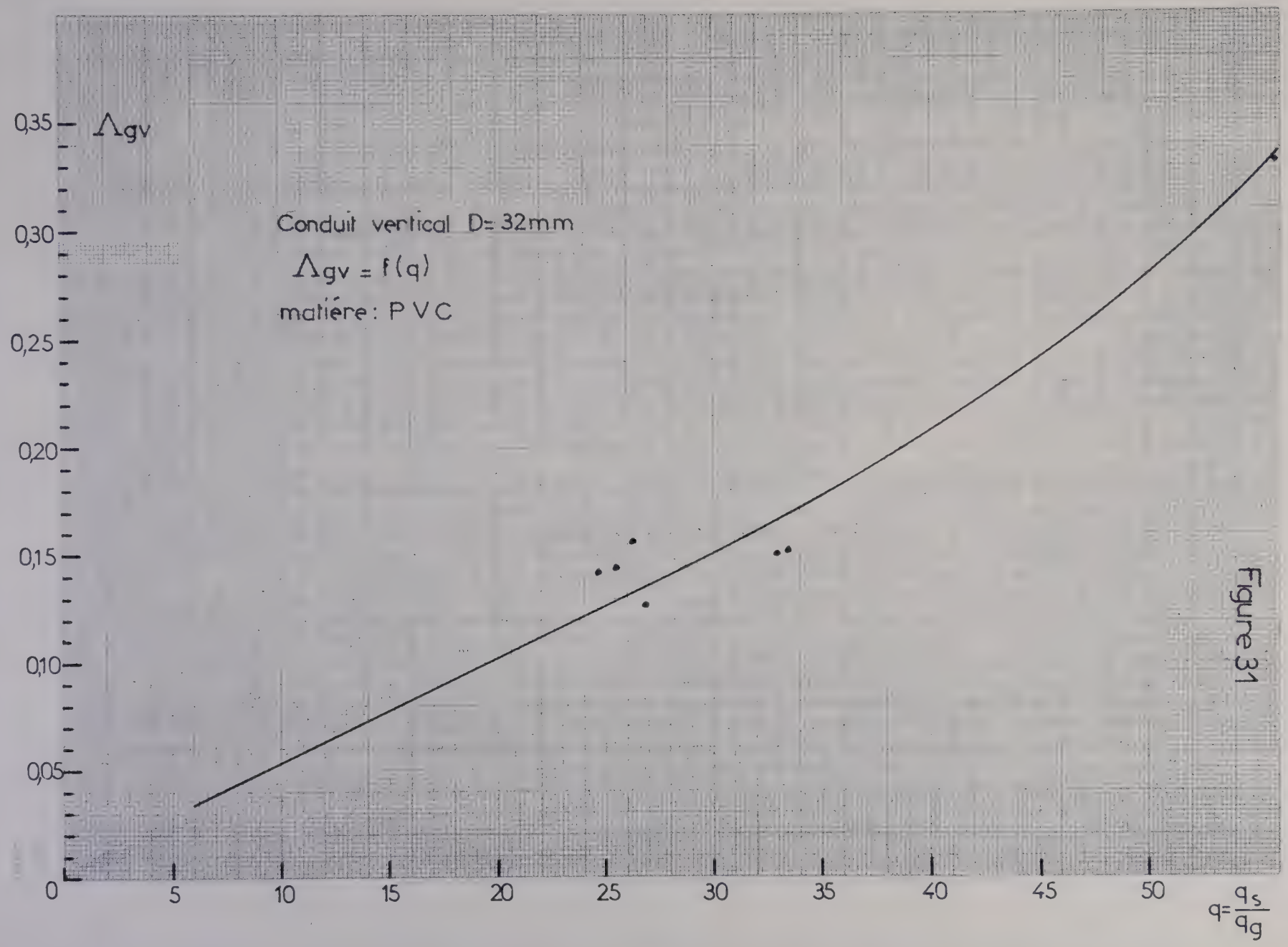

0,35
Λgv
0,30
0,25
0,20
0,15
0,10
0,05
0
Conduit vertical D= 32mm
Λgv = f(q)
matière : P V C
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
q= qs/qg

Figure 31

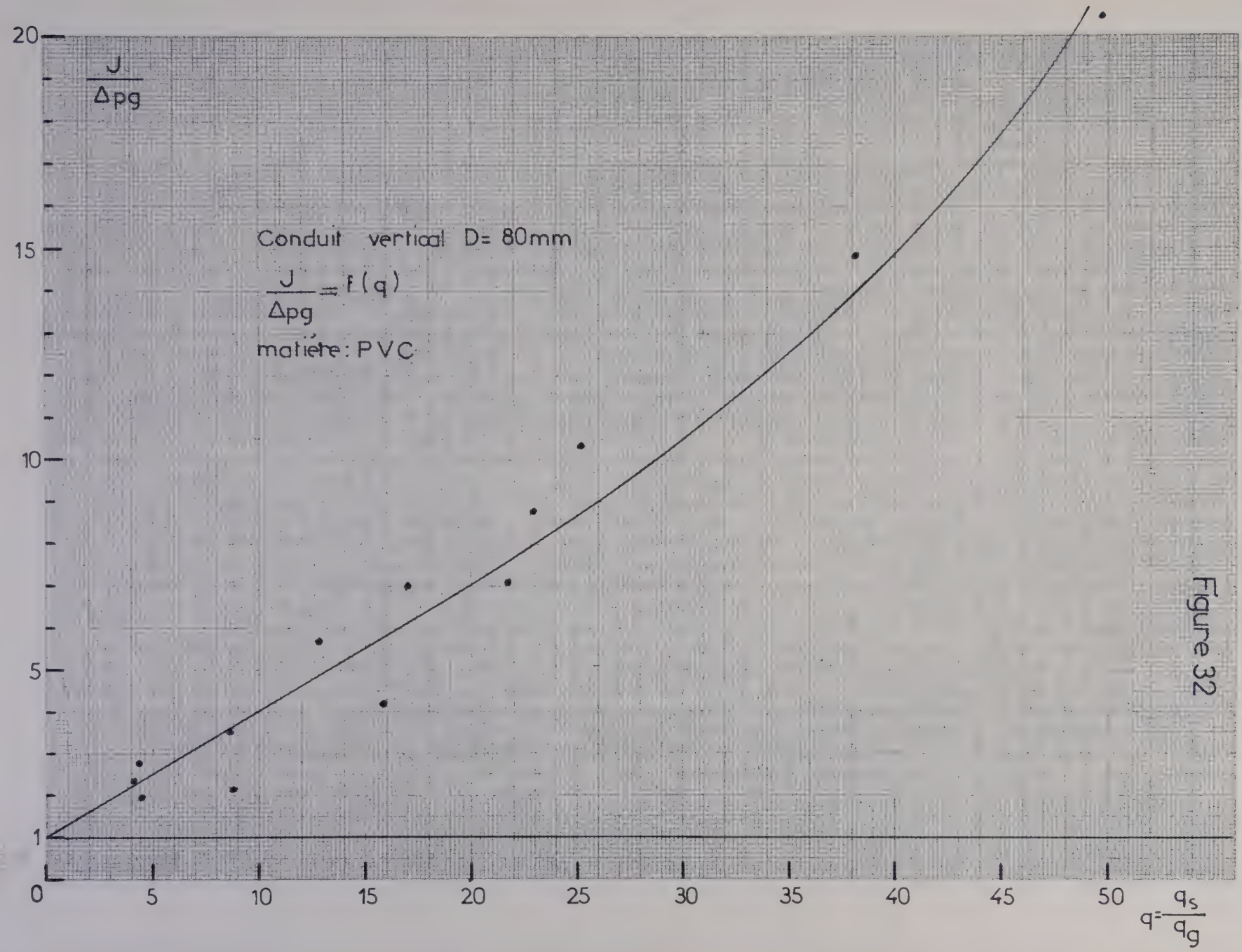

20
15
10
5
1
0
J/Δpg
Conduit vertical D= 80mm
J/Δpg = f(q)
matière: PVC
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
q=qs/qg

Figure 32

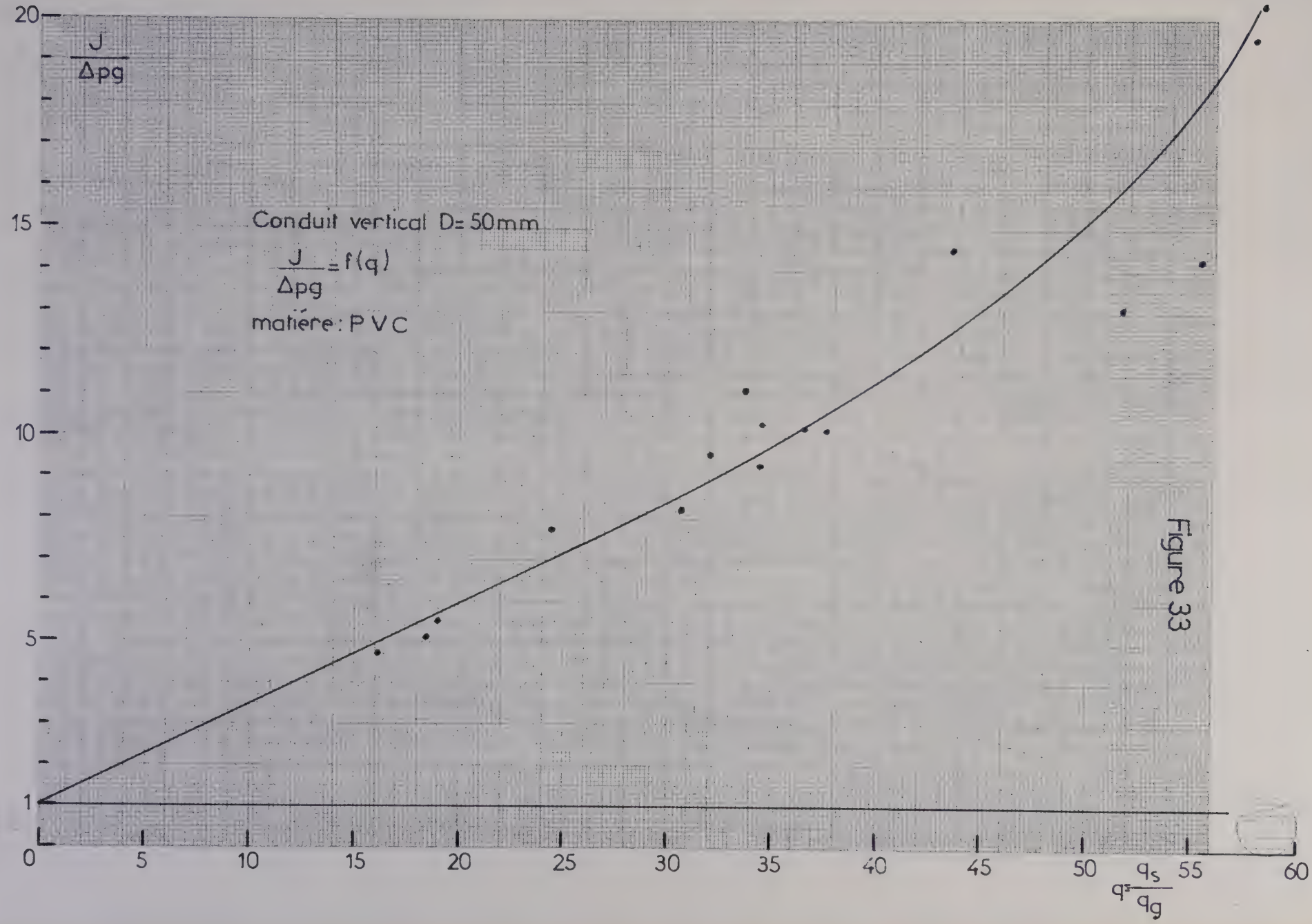

20
15
10
5
1
0
J/Δpg
Conduit vertical D= 50mm
J/Δpg = f(q)
matière : P V C
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
q = qs/qg

Figure 33

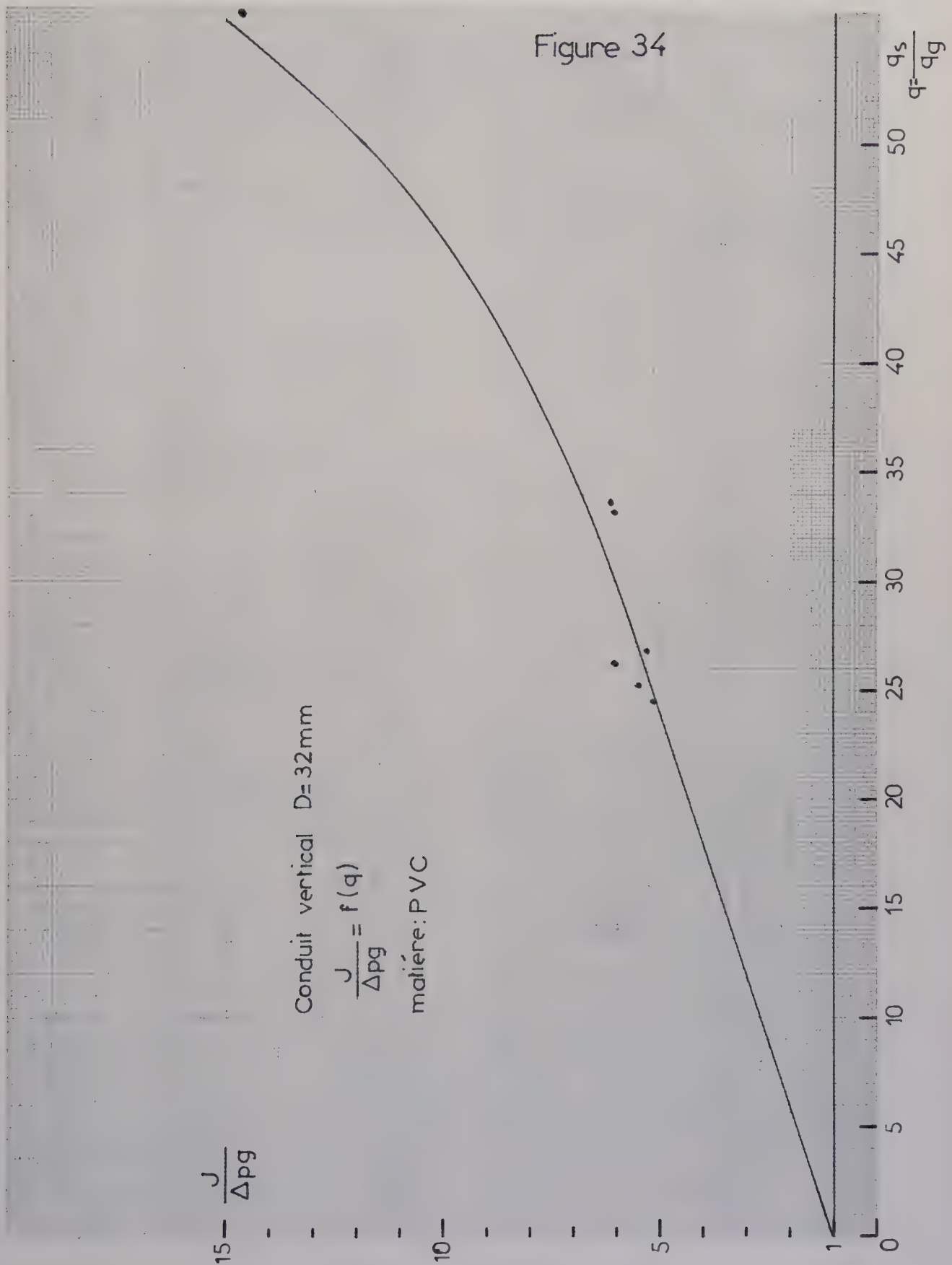

Conduit vertical D=32mm
$\frac{J}{\Delta pg} = f(q)$
matière: PVC
$\frac{J}{\Delta pg}$
15
10
5
1
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
$q = \frac{q_s}{q_g}$

Figure 34

422 - Résultats obtenus avec le PVC en poudre

Caractéristiques physiques des particules
- diamètre moyen des particules d = 0,100 mm
- masse volumique ρ_s = 1,4 g/cm^3

Compte tenu des résultats obtenus sur le sable, nous avons admis également pour le PVC en poudre de prendre pour les dépouillement des essais, la vitesse de chute, de calculer U_g et d'en déduire la concentration spatiale c.

Pour la particule de PVC on trouve w = 0,39 m/s.

On a établi, comme pour les autres produits, les courbes :

$\Lambda_{gv} = f(q)$ figures 35, 36, 37 pour D = 80 - 50 et 32 mm.

et $\frac{J}{\Delta p_g} = f(q)$ figures 38, 39, 40 pour D = 80 - 50 et 32 mm.

Remarques :

Pour les petits diamètres de conduit, D = 32 mm, des difficultés apparaissent au niveau de l'orifice d'écoulement du produit dans la pièce de mise en vitesse, dès que la section de passage est réduite.

Ces difficultés se traduisent par des irrégularités du débit q_s ; c'est pour cette raison que nous avons peu de résultats dans les faibles concentrations de transport q.

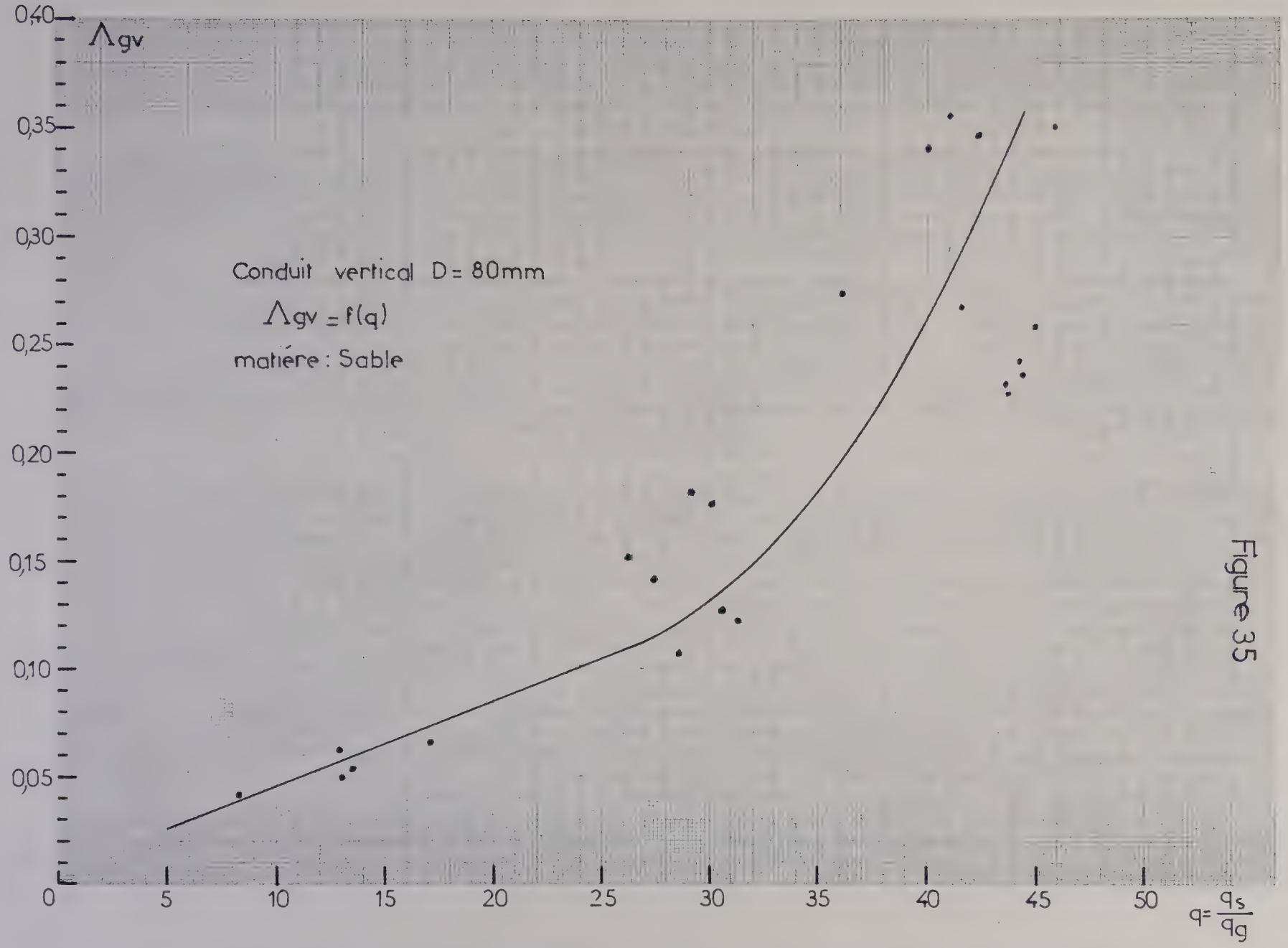

0,40
0,35
0,30
0,25
0,20
0,15
0,10
0,05
0
Λgv
Conduit vertical D = 80mm
Λgv = f(q)
matière : Sable
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
q = qs/qg

Figure 35

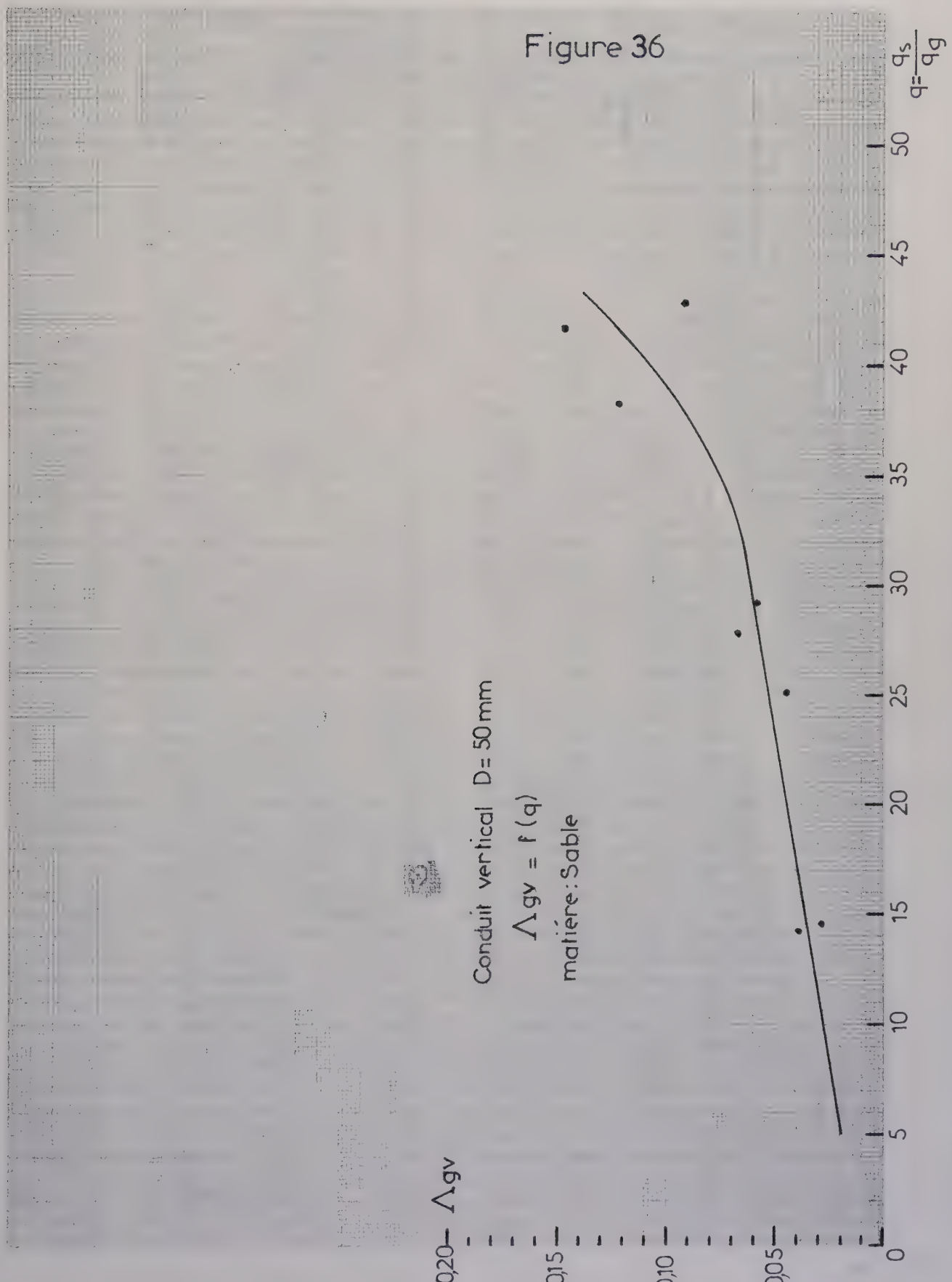

Conduit vertical D= 50 mm
Λgv = f (q)
matière: Sable
Λgv
0,20
0,15
0,10
0,05
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
q=qs/qg

Figure 36

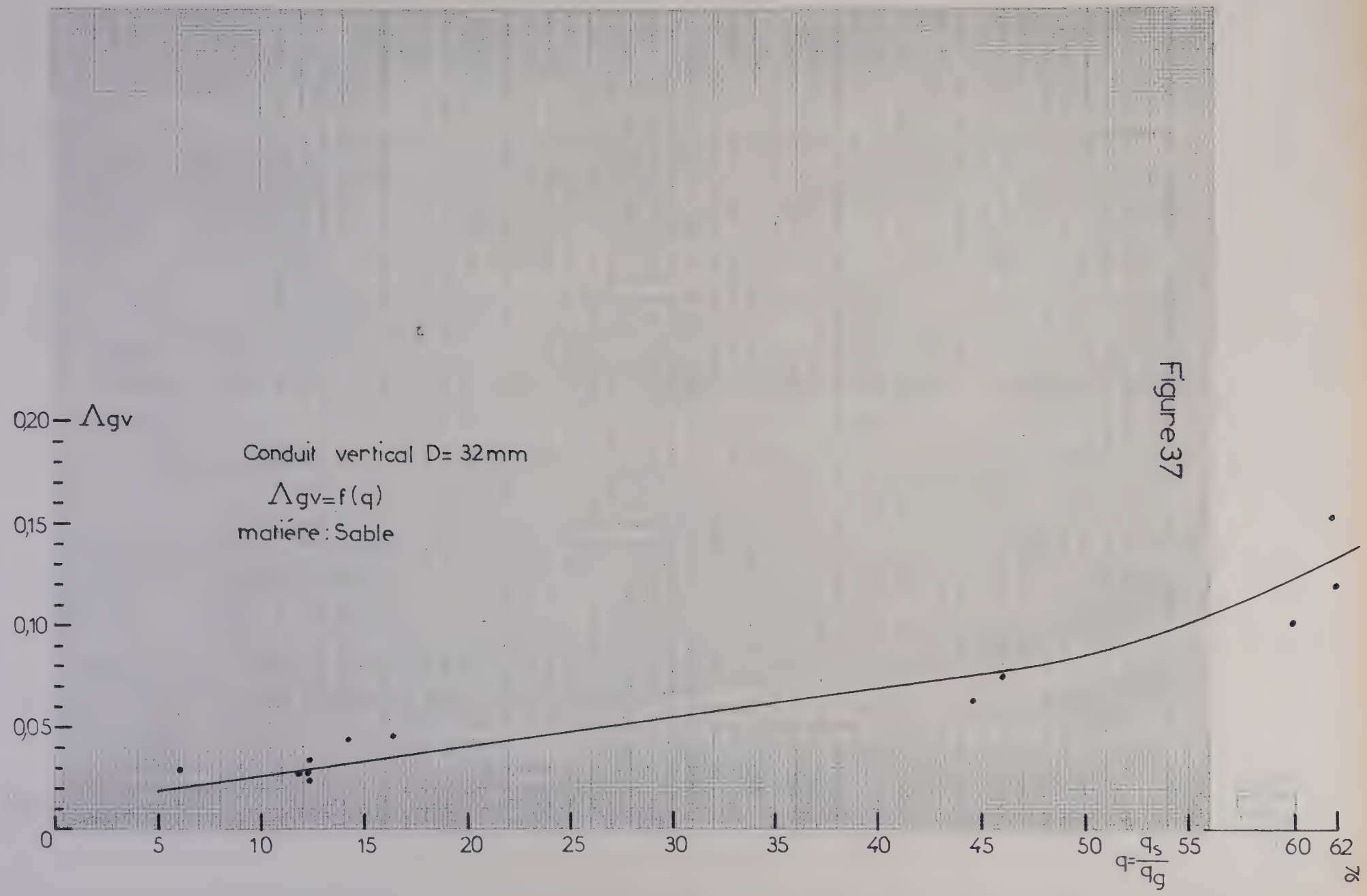


Figure 37
Conduit vertical D= 32mm
Λgv=f(q)
matière : Sable
Λgv
0,20
0,15
0,10
0,05
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
62
q=qs/qg
%

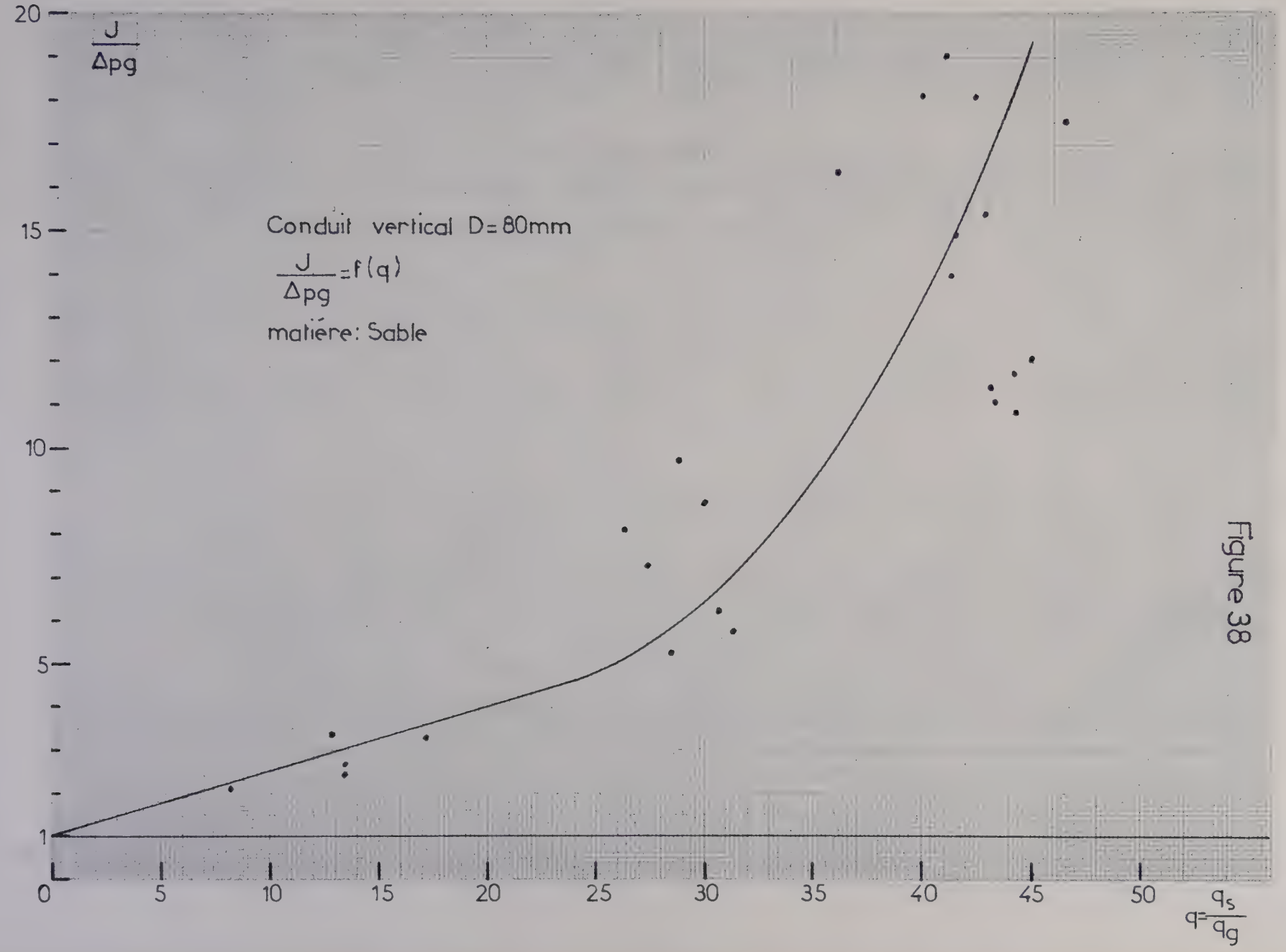

20
15
10
5
1
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
J/Δpg
Conduit vertical D=80mm
J/Δpg = f(q)
matière: Sable
qs/q=qg

Figure 38

Figure 39

Conduit vertical D= 50 mm
$\frac{J}{\Delta pg} = f(q)$
matière : Sable
$\frac{J}{\Delta pg}$
10
5
1
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
$q = \frac{q_s}{q_g}$

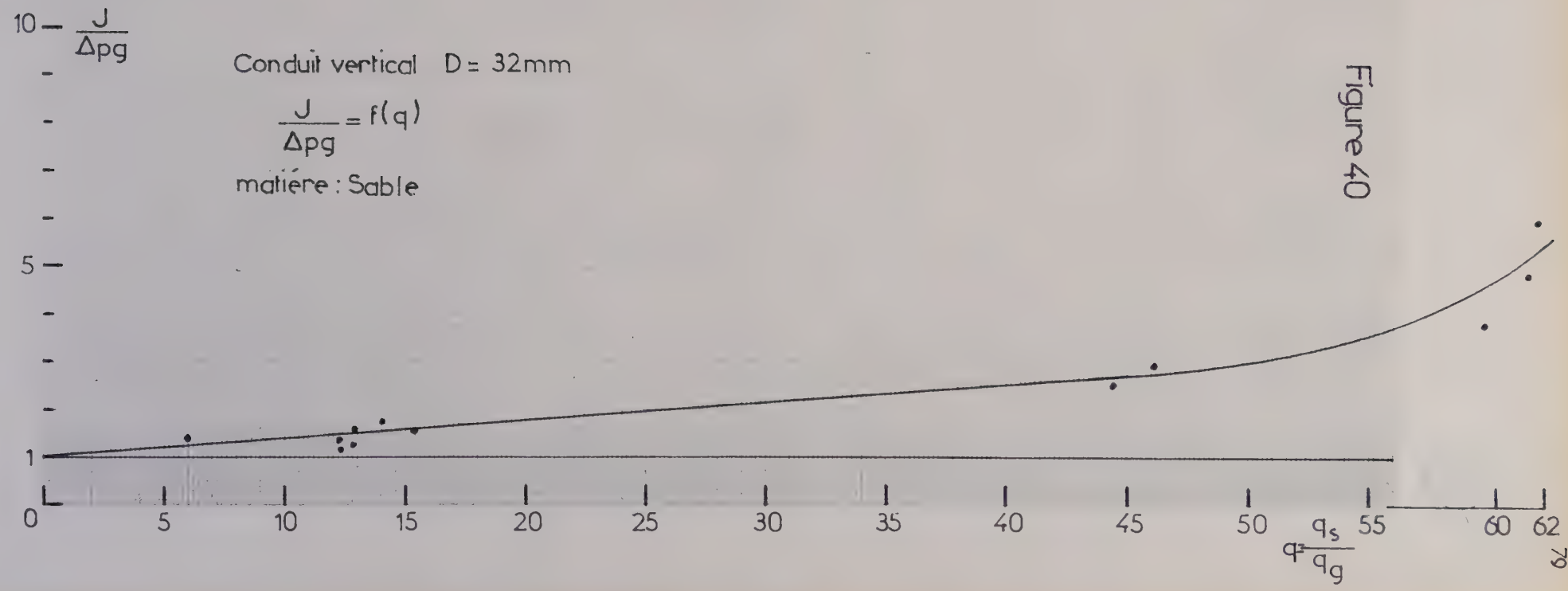

10
$\frac{J}{\Delta pg}$
Conduit vertical D = 32mm
$\frac{J}{\Delta pg} = f(q)$
matière : Sable
5
1
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
62
$q = \frac{q_s}{q_g}$
%

Figure 40

CINQUIEME PARTIE

ANALYSE DES RESULTATS

CONCLUSIONS

5 - ANALYSE DES RESULTATS

51 - Produits granuleux

- Pour les grosses particules, granulés de polyéthylène et blé, le rapport $\frac{U_s}{U_g}$ est de l'ordre de 0,6 ($0,45 < \frac{U_s}{U_g} < 0,7$).

Comme la vitesse du gaz semble avoir une influence prépondérante sur la vitesse des particules, nous avons exprimé les variations du coefficient de trainée moyen C_D en fonction de la vitesse du gaz U_g, qui est prise comme vitesse de référence.

A partir des résultats expérimentaux obtenus pour chacun des produits, nous avons établi la courbe $C_D = f(U_g)$ pour l'ensemble des essais effectués dans les différents conduits (courbe II de la figure 41).

La courbe I, de la même figure, représente les valeurs théoriques du coefficient de trainée C_D déterminées pour une particule isolée d'un diamètre équivalent égal à celui de la sphère de même volume.

Ces valeurs ont été calculées à partir des relations suivantes :

$C_D = 18,5\, \mathcal{R}^{-0,6}$ pour $0 < \mathcal{R} < 500$

et $C_D = 0,44$ pour $500 < \mathcal{R} < 2.10^5$ avec $\mathcal{R} = \frac{\rho_g w d}{\mu_g}$

Etant donné que les diamètres moyens d des particules de polyéthylène et de blé sont très voisins, les 2 courbes $C_D = f(U_g)$ sont pratiquement confondues.

- On remarque pour $U_g > 20$ m/s que le coefficient de trainée est sensiblement le même que celui d'une sphère. Pour 10 m/s $< U_g <$ 20 m/s, le coefficient de trainée est par contre plus important et se situe plus près de celui d'un cylindre.

- Pour des valeurs du rapport des débits en masse $q = \frac{q_s}{q_g} < 30$ on peut exprimer le coefficient Λ_{gv} sous la forme $\Lambda_{gv} = a + bq$ et le rapport $\frac{J}{\Delta_{pg}}$ sous la forme $\frac{J}{\Delta_{pg}} = 1 + eq$. A noter qu'en pratique dès que q est supérieur à quelques unités ($q > 5$) a est négligeable devant bq, b et e étant fonction de f_s et des dimensions des particules.

- Si l'on prend le rapport des débits en volume $q_v = \frac{q_{vs}}{q_{vg}}$ et que l'on examine la courbe $\Lambda_{gv} = f(q_v)$, on constate qu'il y a un regroupement des résultats pour les 2 types de particules (voir figures 42-43-44 pour D = 80 - 50 et 32 mm).

- Le coefficient Λ_{gv}, qui est sensiblement le même pour les 2 produits, semble être une fonction croissante du rapport $\frac{D}{d}$.

- Pour des valeurs $q > 30$ on remarque une augmentation assez forte du coefficient Λ_{gv} et de Δp. Les fluctuations de pression deviennent d'ailleurs de plus en plus importantes lorsque la concentration de transport croît et la vitesse U_g diminue.

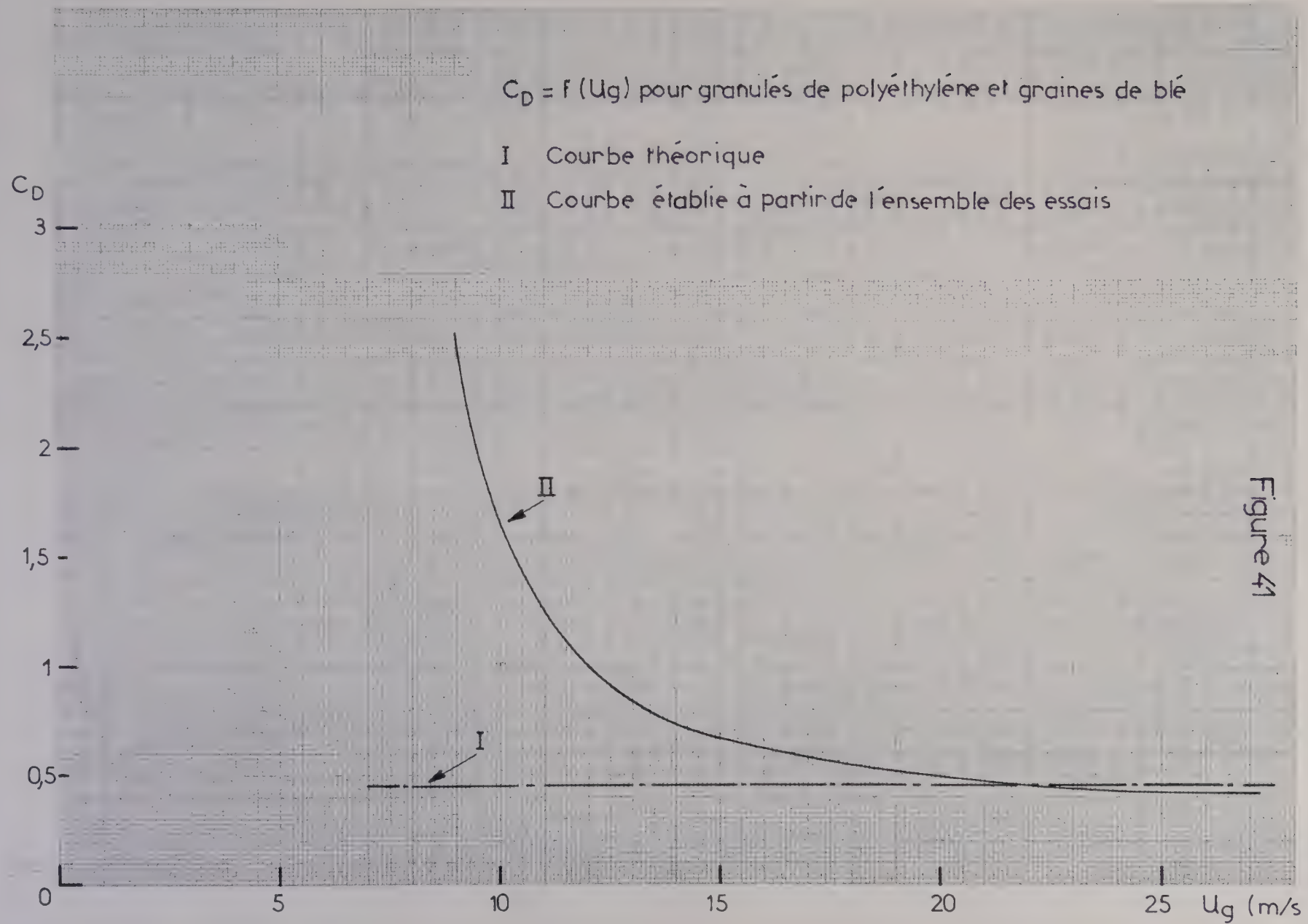

$C_D = f(Ug)$ pour granulés de polyéthylène et graines de blé
I Courbe théorique
II Courbe établie à partir de l'ensemble des essais
C_D
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
5
10
15
20
25
Ug (m/s)
II
I

Figure 41

Conduit vertical D=80 mm

$\Lambda gv = f(qv)$

matière: • Granulés de polyéthylène

+ Blé

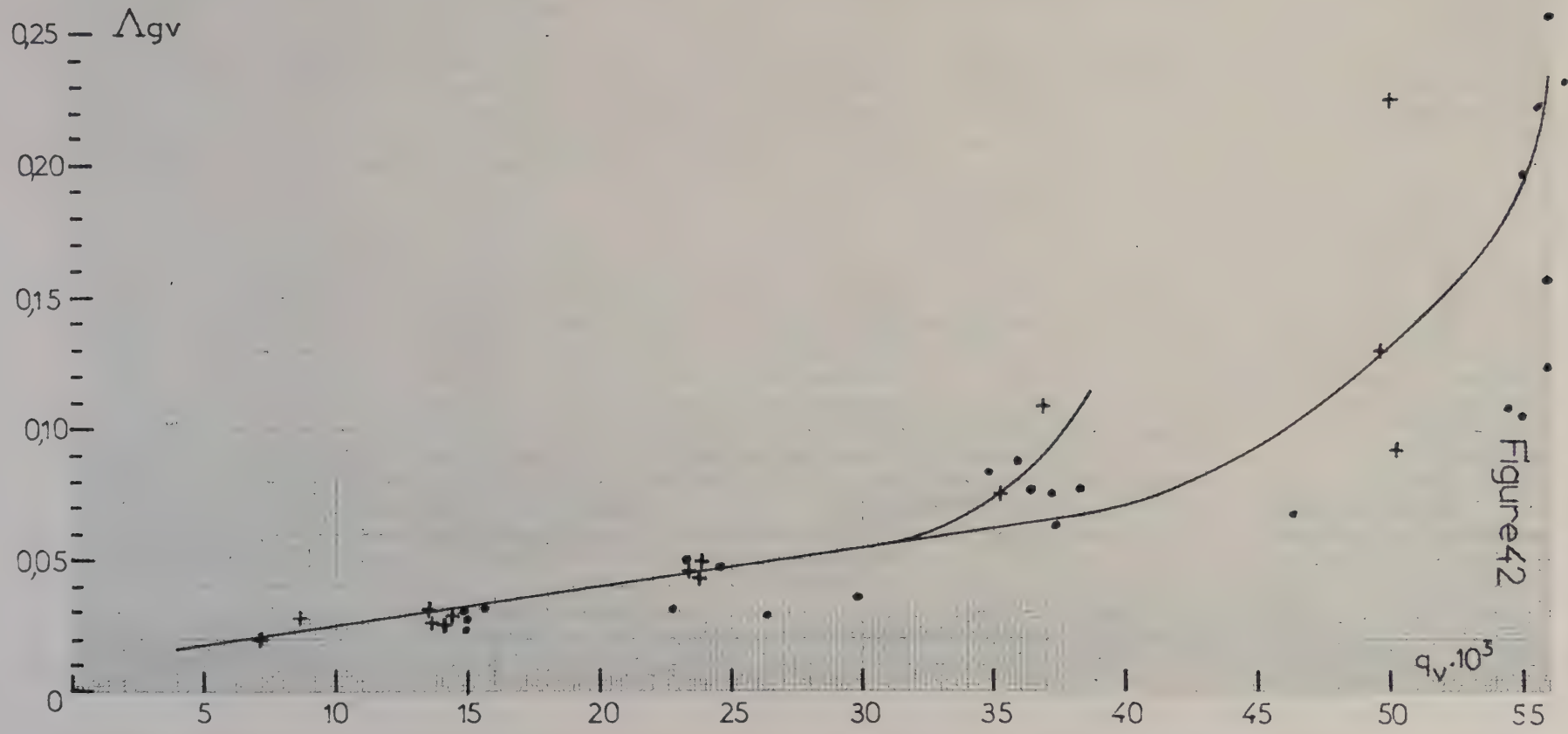


Figure42

Conduit vertical D=50 mm

$\Lambda gv = f(qv)$

matière: • Granulés de polyéthylène

+ Blé

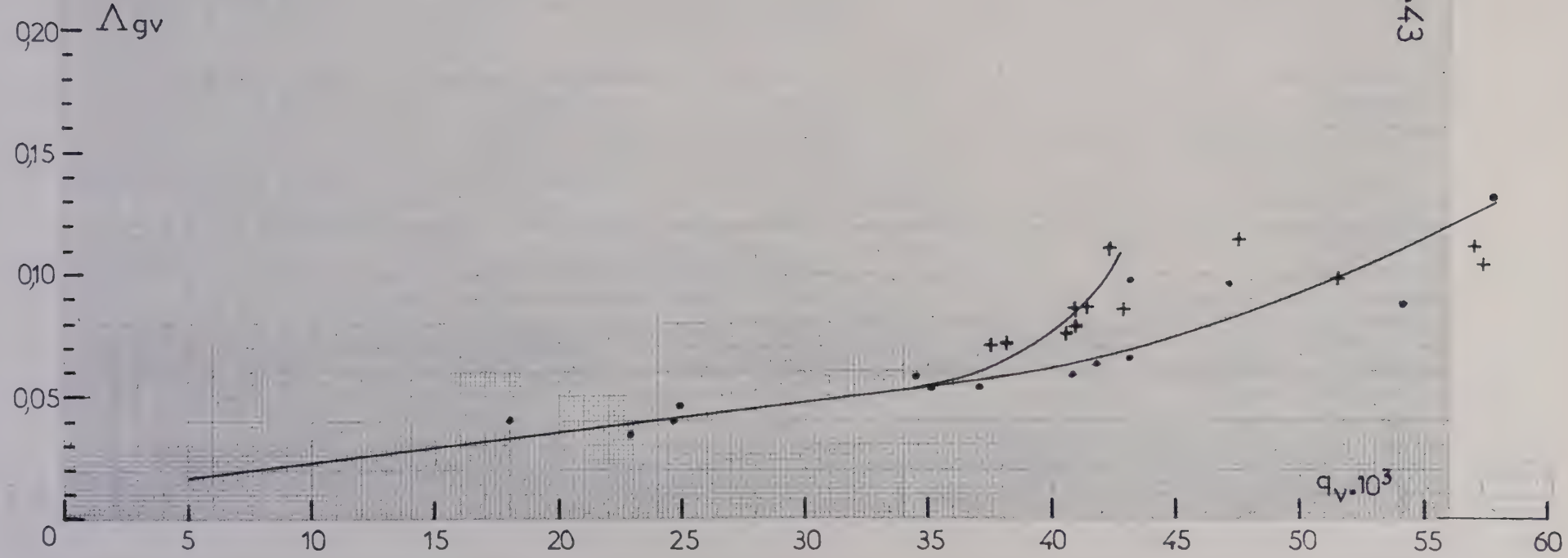


Figure 43

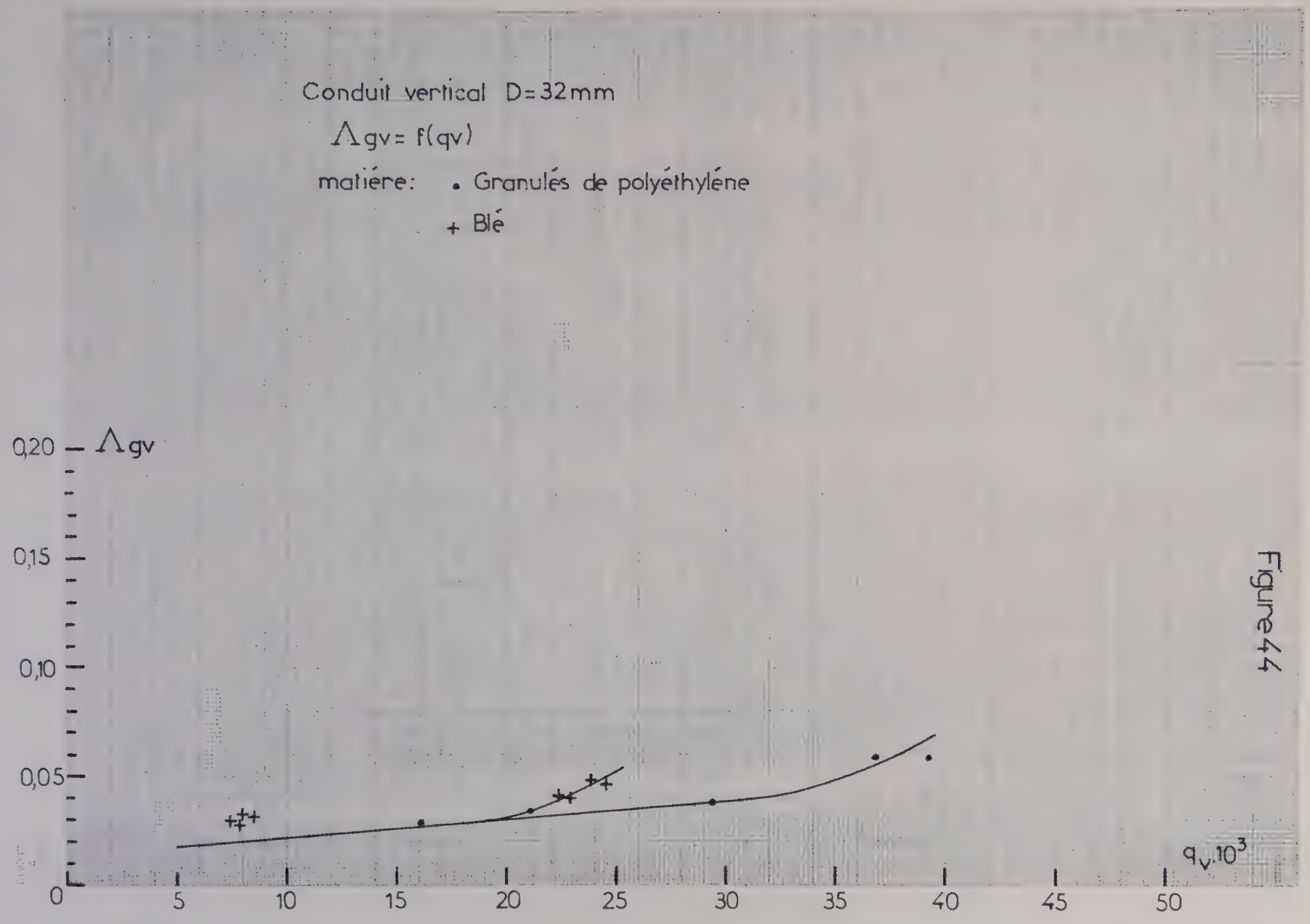

Conduit vertical D=32mm
Λgv= f(qv)
matière: • Granulés de polyéthylène
+ Blé
Λgv
0,20
0,15
0,10
0,05
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
qv.10³

Figure 44

52 - Produits pulvérulents

Compte tenu des résultats obtenus sur le sable, à partir de la mesure de la concentration spatiale c, on constate que pour les fines particules, la vitesse de glissement $U_g - U_s$ est voisine de la vitesse de chute w d'une sphère isolée de même diamètre.

Elle reste du même ordre de grandeur lorsqu'on fait varier la vitesse du gaz et semble ne pas dépendre de la concentration spatiale c, qui au cours de nos travaux n'a pas été supérieure, en général, à 10 %.

- Comme pour les produits granuleux, on peut exprimer le coefficient Λ_{gv} pour $q < 30$, sous la forme $\Lambda_{gv} = a + bq$ et le rapport $\frac{J}{\Delta_{pg}}$ sous la forme $\frac{J}{\Delta_{pg}} = 1 + eq$.

  On remarque également que a devient négligeable devant bq dès que $q > 5$ (b et e étant fonction de f_s et des dimensions des particules).

- On observe, pour des mêmes valeurs q, que Λ_{gv} sable $< \Lambda_{gv}$ PVC.

- Si l'on exprime Λ_{gv} en fonction du rapport des débits en volume $qv = \frac{q_{vs}}{q_{vg}}$, on obtient un regroupement des résultats d'essais pour les 2 produits. Cependant la dispersion est plus grande que celle obtenue pour les produits granuleux.

- Pour des valeurs $q > 30$ on constate également une augmentation rapide du coefficient Λ_{gv}

  A noter toutefois que lorsque Λ_{gv} augmente brutalement on se trouve pratiquement à la limite de la vitesse de transport.

- Tant que l'on n'a pas atteint la zone voisine du dépôt, Λ_{gv} décroît en même temps que le nombre de Froude F', à concentration spatiale c constante (voir figure 48).

- J diminue lorsque F' décroît à débit-masse q_s constant (voir fig. 49), mais il ne faut pas extrapoler les courbes vers les faibles valeurs de F',

car J et par conséquent Δ_{pg} ne diminuent pas au delà des limites indiquées.

Au contraire, pour des valeurs $\mathcal{F}'$ inférieures il y a une brutale augmentation de la perte de pression qui se traduit par le dépôt de la matière transportée dans la partie basse du conduit vertical.

- La longueur de référence à considérer dans le nombre de Froude semble être le diamètre D du conduit plutôt que le diamètre équivalent d des particules. On trouve en effet pour $\mathcal{F}' = \frac{U_g}{\sqrt{gD}}$ des valeurs minimales du même ordre de grandeur pour le blé et pour le PVC en poudre, alors que le rapport d_1/d_2 des diamètres d des particules est voisin de 40 et que $\sqrt{gd_1}/\sqrt{gd_2}$ est supérieur à 6. D'autre part lorsque U_g décroît, la vitesse des particules U_s est très fortement ralentie, elle tend vers zéro et devient même négative près des parois ; les particules descendent le long du conduit dans la zone où la vitesse U_g est faible, mais sont reprises dans le courant ascendant dès qu'elles quittent la bande très étroite au voisinage de la paroi.

On constate que la valeur moyenne des fluctuations de la concentration spatiale c, est très importante ce qui se traduit également par de très fortes fluctuations de pression.

- On a également examiné les variations du rapport $\left(\frac{J}{\Delta_{pg}} - 1\right)/c$ en fonction de $\frac{gD}{U_g^2}$.

A partir des résultats d'essais sur le sable en conduits D = 80, 50 et 32 mm on a établi les courbes représentées sur la figure 50. Elles peuvent être mises sous la forme :

$$\mathrm{Log}\left(\frac{J}{\Delta_{pg}} - 1/c\right) = \alpha - \beta \,\mathrm{Log}\,\frac{gD}{U_g^2} \qquad \alpha \text{ étant fonction de } c$$

ou $$\frac{J}{\Delta_{pg}} - 1 = Kc\left(\frac{U_g^2}{gD}\right)^{\beta} \qquad \text{avec } K = f(c)$$

On remarque que la perte de pression décroît en même temps que le diamètre D du conduit à concentration c constante, c'est à dire que Λ_{gv} est une fonction croissante de $\frac{D}{d}$, ce qui se vérifie pour l'ensemble des essais effectués avec les produits granuleux et pulvérulents.

- Le coefficient Λ_{gv} relatif aux particules de sable et de PVC est supérieur à celui correspondant aux granulés de polyéthylène et au blé, pour les mêmes valeurs de q.

Ce coefficient plus important pour les produits de petites dimensions, peut s'expliquer par la présence d'un nombre plus important de particules dans la zone près de la paroi, ces particules jouant le rôle de rugosité.

- On note également que Λ_{gv} est une fonction décroissante de ρ_s/ρ_g pour des particules de nature différente mais de dimensions d égales ou très voisines. Ceci est dû au fait que pour une même valeur de q ou de c un élément de volume du conduit contient un plus grand nombre de particules lorsque leur masse volumique est plus faible. Il doit en être de même dans la zone près de la paroi.

53 - CONCLUSION

- En conduite verticale il est extrêmement important de connaître la concentration spatiale moyenne c, ou la vitesse U_s des particules. En effet, comme on a pu le constater au cours de nos essais, la pression hydrostatique $g[\rho_s c + \rho_g(1-c)]$ peut représenter une très grande part de la perte de pression totale dans le conduit vertical.

- La mesure de la vitesse des particules ou de la concentration spatiale peut être obtenue avec une très bonne approximation au moyen de prises de vues ou de radio-éléments pour les grosses particules, ou par l'atténuation d'un rayonnement émis par une source radio-active pour les fines particules.

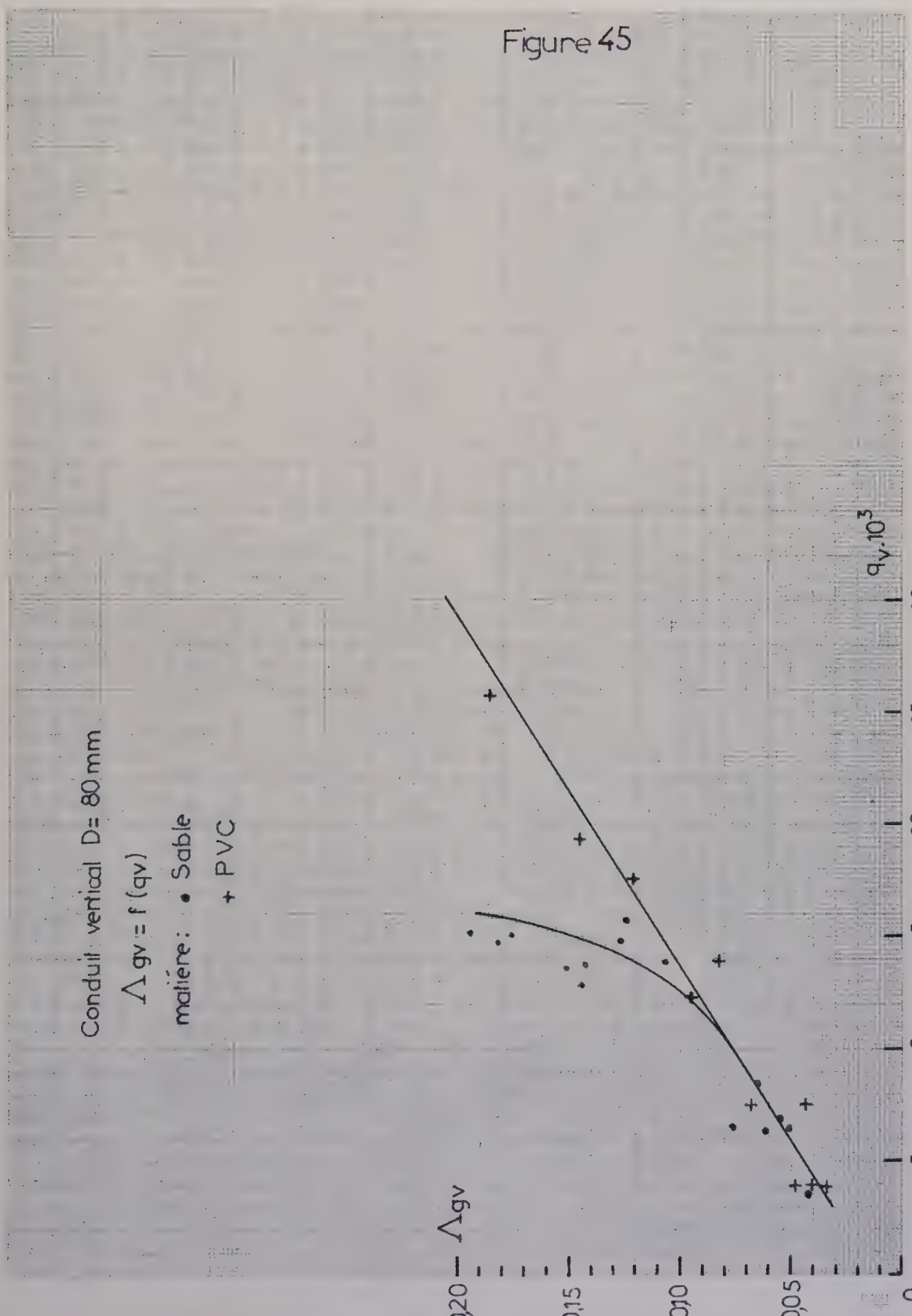
- Compte tenu des difficultés à réaliser des mesures locales et à faire varier séparément les différents paramètres il est intéressant d'effectuer un grand nombre d'expériences de manière à dégager des valeurs moyennes et d'exprimer les résultats en fonction des grandeurs caractéristique suivantes :

$$\frac{\rho_s}{\rho_g}, \frac{D}{d}, q, c, F \text{ et } R$$

- Il faut noter également qu'au cours de ces essais on a travaillé avec des valeurs de q importantes comprises entre 10 et 50, c'est à dire couvrant et même dépassant largement les concentrations qui sont adoptées généralement en pratique industrielle.

Il serait souhaitable d'ailleurs de poursuivre ces travaux pour des valeurs q supérieures en combinant les différents moyens de mesure utilisés lors de cette recherche pour la détermination de la concentration spatiale c.

Figure 45


Conduit vertical D= 80 mm
Δ gv = f (qv)
matière : • Sable
+ PVC
Δgv
0,20
0,15
0,10
0,05
0
5
10
15
20
25
30
qv.10³

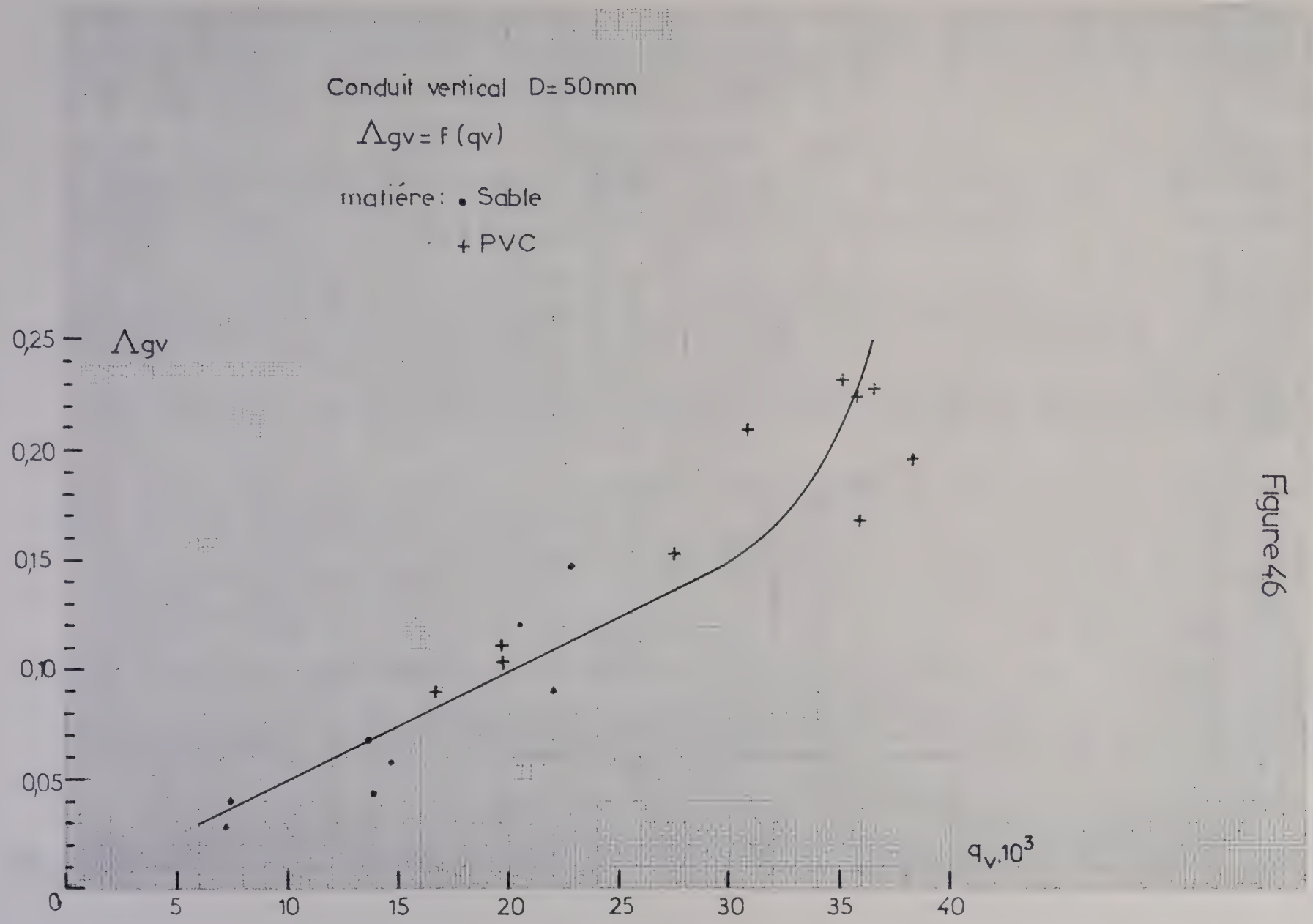
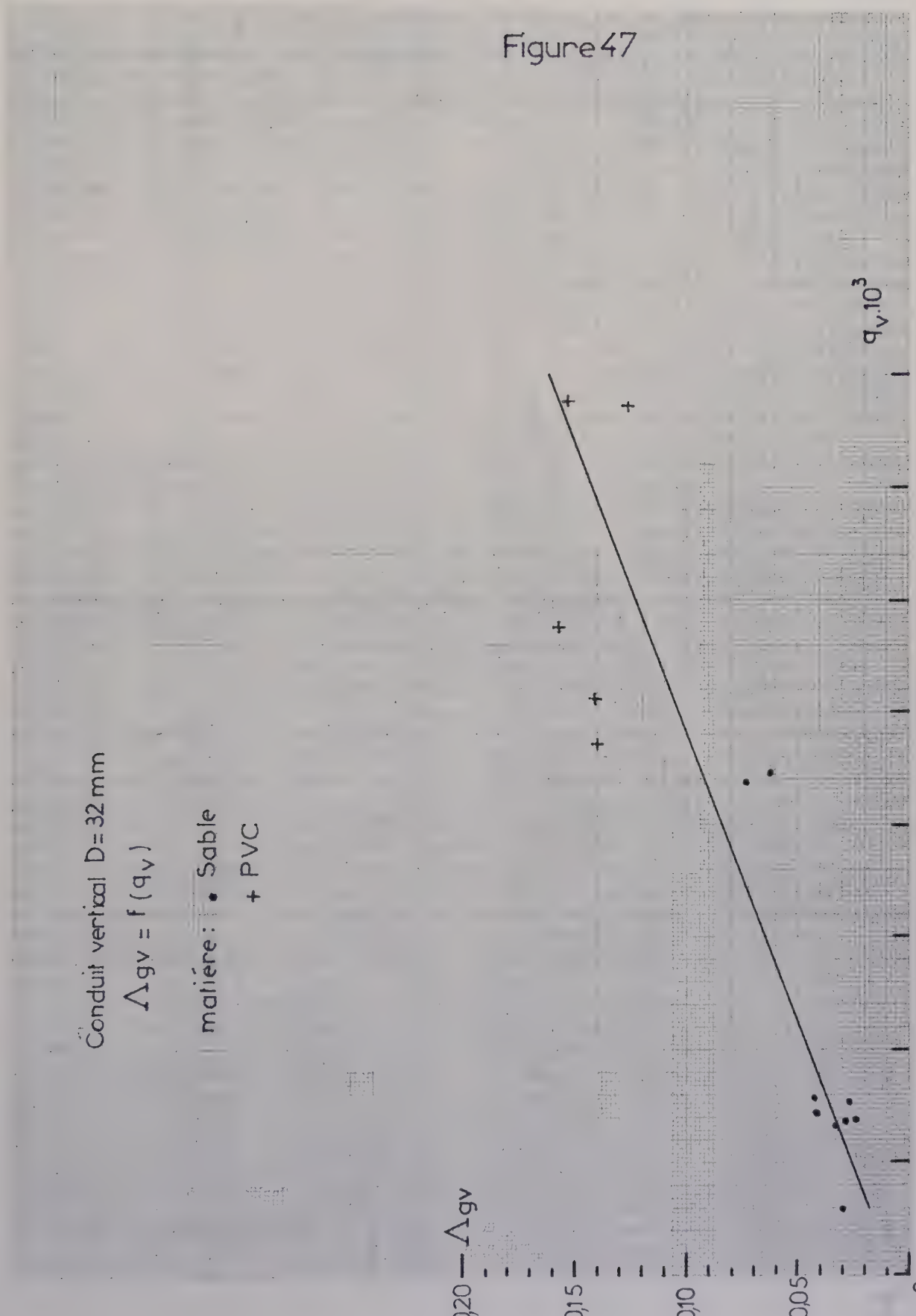

Conduit vertical D= 50mm
Λgv = f (qv)
matière : • Sable
+ PVC
Λgv
0,25
0,20
0,15
0,10
0,05
0
5
10
15
20
25
30
35
40
qv.10³

Figure 46

Figure 47


Conduit vertical D= 32 mm
Δgv = f(qv)
matière : • Sable
+ PVC
Δgv
0,20
0,15
0,10
0,05
0
5
10
15
20
25
30
35
40
qv.10³

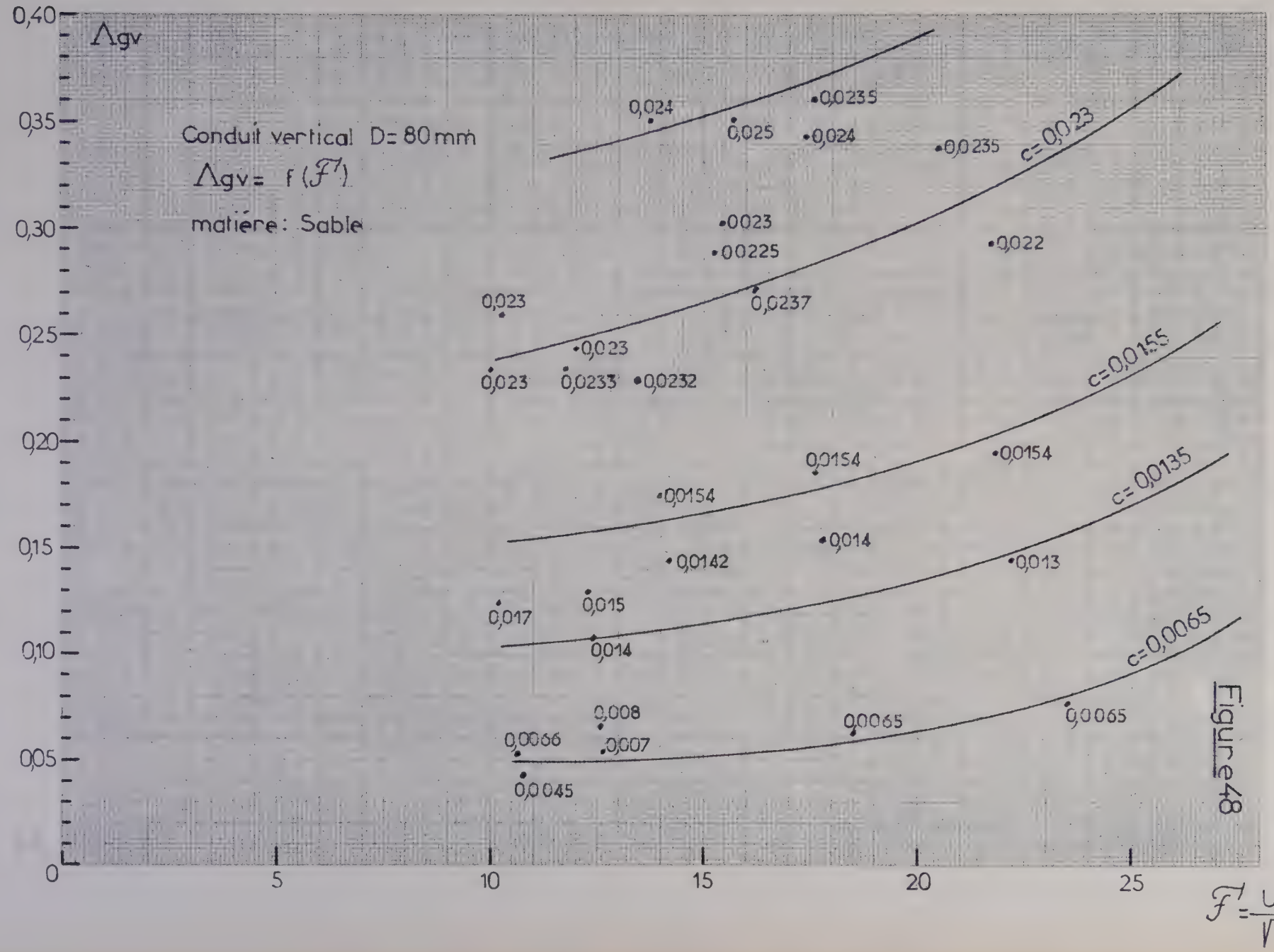

Λgv
Conduit vertical D= 80 mm
Λgv = f(F')
matière: Sable
c=0,023
c=0,0155
c=0,0135
c=0,0065
0,024
0,025
0,024
0,0235
0,0235
0,0023
0,00225
0,022
0,023
0,0237
0,023
0,023
0,0233
0,0232
0,0154
0,0154
0,0154
0,0142
0,014
0,013
0,017
0,015
0,014
0,008
0,007
0,0066
0,0045
0,0065
0,0065
0,40
0,35
0,30
0,25
0,20
0,15
0,10
0,05
0
5
10
15
20
25
F' = Ug / √gD

Figure 48

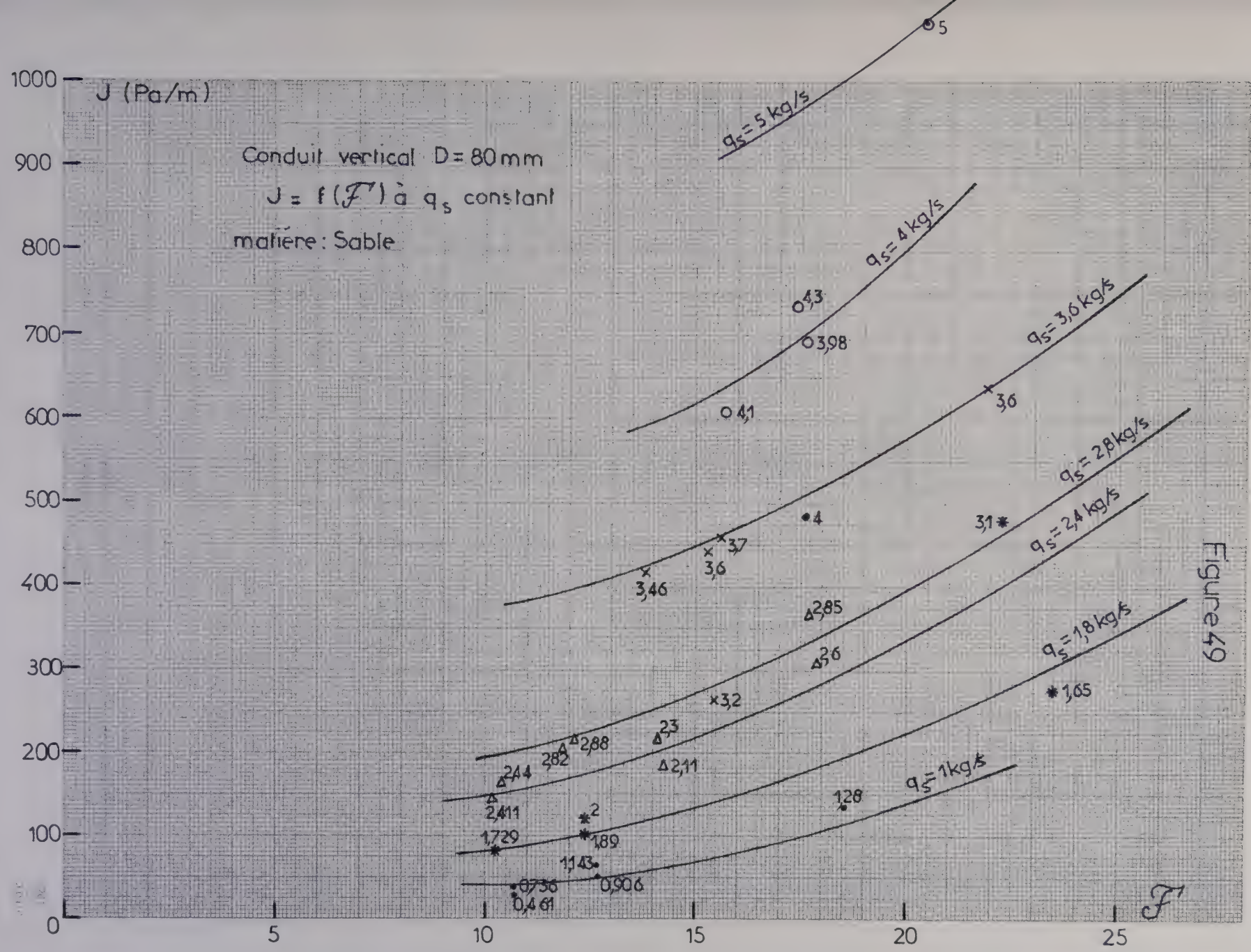
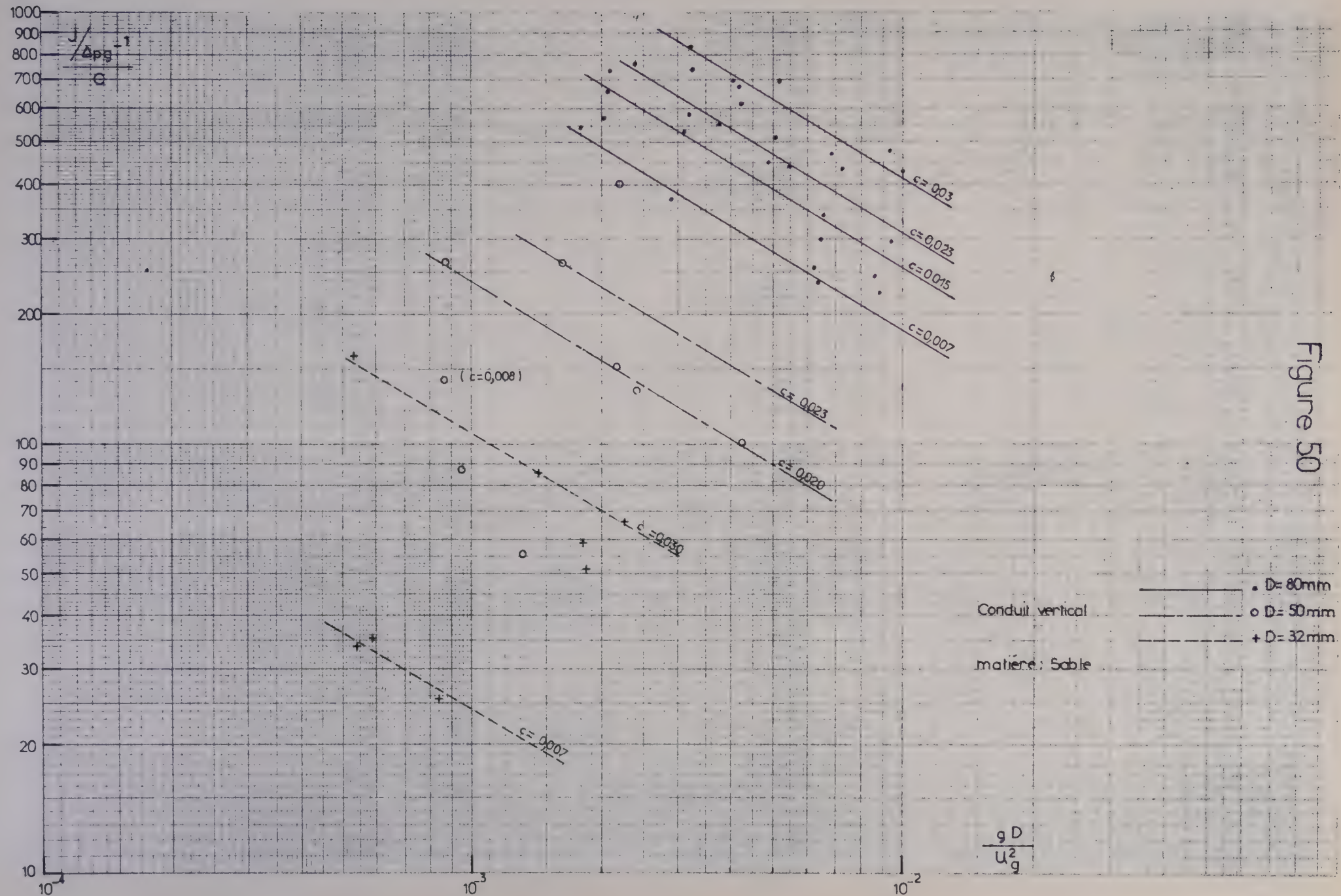

J (Pa/m)
Conduit vertical D = 80 mm
J = f(F) à qs constant
matière : Sable
qs = 5 kg/s
qs = 4 kg/s
qs = 3,6 kg/s
qs = 2,8 kg/s
qs = 2,4 kg/s
qs = 1,8 kg/s
qs = 1 kg/s
F
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
5
10
15
20
25
5
0,43
3,98
4,1
3,6
4
3,1
3,7
3,6
3,46
2,85
3,6
3,2
2,88
2,82
2,44
2,23
2,11
2,411
1,729
2
1,89
1,43
0,906
0,736
0,461
1,28
1,65

Figure 49



$\frac{J/\Delta\rho g^{-1}}{G}$
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
10^{-4}
10^{-3}
10^{-2}
$\frac{gD}{U_g^2}$
c= 0,03
c= 0,023
c= 0,015
c= 0,007
c= 0,023
c= 0,020
c= 0,030
c= 0,007
o (c=0,008)
Conduit vertical
matière : Sable
• D= 80mm
o D= 50mm
+ D= 32mm

Figure 50

SIXIEME PARTIE

ANNEXES

ANNEXE I

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

Si de nombreux travaux ont été effectués dans le domaine des écoulements diphasiques (on a recensé plus de 1000 références bibliographiques depuis le début du siècle), il existe par contre peu de publications relatives à l'étude proprement dite des vitesses des particules solides en suspension dans un gaz, ou de la mesure de la concentration spatiale dans un conduit de transport pneumatique.

Quelques auteurs ont abordé ce sujet, mais le plus souvent se sont placés dans les conditions les plus favorables afin d'éliminer certaines difficultés qui ne permettent pas d'obtenir des mesures significatives.

C'est ainsi que la plupart des recherches sur les vitesses des particules et les concentrations spatiales ont été effectuées pour de faibles rapports des débits en masse q_s/q_g (en général les rapports q sont inférieurs à 10, quelques uns atteignent des valeurs de l'ordre de 15 kg de matière par kg d'air).

Il faut souligner également que certains dispositifs de mesure ne permettent pas d'adopter des valeurs q_s/q_g importantes. C'est le cas de l'anémomètre laser à effet Doppler dont l'emploi est limité à de faibles valeurs de q et aux particules de très petites dimensions.

D'autre part les installations d'essais étaient souvent de dimensions réduites et ne possédaient pas de circuit suffisamment long pour atteindre le régime établi.

Des recherches ont été menées également sur le coefficient de trainée C_D des solides. Les résultats obtenus sont difficiles à interprêter, les écarts entre les valeurs trouvées par les différents auteurs étant importants. Ceci est probablement dû au fait que les essais n'ont pas été réalisés dans des conditions semblables. En effet les mesures ont été faites, soit sur une particule fixe placée en soufflerie, ou se déplaçant dans un conduit, soit sur plusieurs particules en suspension dans un gaz. D'une manière générale la dispersion est très grande.

Il nous a été difficile de comparer les résultats de nos travaux à ceux obtenus par d'autres chercheurs étant donné que finalement peu d'essais ont été effectués en conduit vertical, la plupart ayant été réalisés en tuyauterie horizontale

On trouve cependant une documentation un peu plus importante sur l'étude des vitesses des particules solides en suspension dans un liquide.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- FORTIER A. "MECANIQUE DES SUSPENSIONS"
  Ed. Masson et Cie 1967

- BUTERY P. Thèse de Doctorat 3è cycle - Paris 1969

- LAURENT J.J. Thèse de Docteur-Ingénieur
  Université Paris VI - 1972

- VINCENT J. Compte-rendu Acad. Sc. - Paris. p. 337-340 et 614-616 (1968)

- LE COURRIER DES ETS. NEU - N°56 - Juillet 1972 (Lille)

- PNEUMOTRANSPORT 1 (Recueil des Communications)
  First international Conference on the pneumatic transport of solids in pipes 6-8 Sept. 1971 - BHRA - Guildford - England.

- PNEUMOTRANSPORT 2 (Recueil des Communications)
  Second international Conference on the pneumatic transport of solids in pipes 5-7 Sept. 1973 - BHRA - Guildford - England.

- TOROBIN L.B. and GAUVIN WH.
  Fundamental aspects of solids-gas flow - The Canadian Journal of Chemical Engineering 1960.

- NOUVELLON D. Etude expérimentale d'un écoulement gaz particules dans une conduite horizontale. Institut Von Karman, Bruxelles - Juin 1973

- CONDOLIOS E. Revue "Mines" n° 105-107-109-110
  (Transport hydraulique des matériaux solides en conduites)

- DURAND E. "La Houille Blanche" Mai-Juin 1951

- MICHALIK A. : Density Patterns of the inhomogeneous liquids in the industrial pipe-lines measured by incans of radiometrie scanning.
La Houille Blanche, N°1 - 1973.

- SEGLER G. "Pneumatic Grain Conveying"
National Institute of agricultural
Engineering Wrest Park.

- ZENZ F.A. and DONALD F. OTHMER
"Fluidization and Fluid-Particle Systems"
Reinhold Chemical Engineering Scries.

ANNEXE II

- Dispositif de mesure de la concentration spatiale dans une section droite du conduit.

- Rappel de la méthode.

La mesure est basée sur l'atténuation du rayonnement émis par une source scellée radioactive.

Le principe de la mesure est le suivant : si de part et d'autre du conduit de transport on dispose une source de rayons et un détecteur de radioactivité, l'activité mesurée par ce dernier est fonction de la concentration spatiale moyenne du mélange diphasique traversé par le faisceau.

L'ensemble de mesure par absorption comprend :

- une source de rayonnement.
- un détecteur
- un système de comptage et d'enregistrement.

- Description du matériel

a - La source de rayonnement.

Lors de nos essais nous avons utilisé le rayonnement β d'une source Strontium - Yttrium 90. Ce rayonnement constitué en fait d'électrons présente un coefficient d'absorption massique élevé ce qui explique le bon contraste obtenu.

La matière radioactive est enfermée dans une capsule métallique en acier inoxydable et présente du côté du rayonnement une fenêtre mince d'acier de 10/100 de mm d'épaisseur.

Cette source est placée à l'intérieur d'un porte source qui permet la protection biologique de l'expérimentateur et le positionnement de la source par rapport au détecteur ce qui élimine les erreurs géométriques d'alignement source-détecteur.

Activité : 1,06 mC

b - Le détecteur et la chaine de mesure

C'est une sonde bêta type SBS 50. Le principe de son fonctionnement est le suivant : un électron ayant traversé l'écran absorbant frappe la sonde sur sa partie avant. A cet emplacement se trouve un scintillateur plastique qui transforme ces particules en photons. Ces photons attaquent ensuite un photo-multiplicateur et l'on sort finalement de la sonde une série d'impulsions qui pénètrent à leur tour dans un intégrateur.

Cet intégrateur (type SPP3 - CEN SACLAY) possède, entre autres, deux fonctions :

- mise en forme des impulsions avant leur comptage à l'aide d'une échelle
- intégration de l'information qui permet de la recueillir sous une forme analogique à l'aide d'un enregistreur potentiométrique.

Donc, en sortant de l'intégrateur, l'information est délivrée sous deux formes :

- information digitale qui permet de connaître le nombre de "coups" reçus par le détecteur pendant un temps choisi (1 - 10 - 100 ou 1000 secondes).
- information analogique qui visualise sur le papier de l'enregistreur les fluctuations instantanées de la masse-écran absorbant le rayonnement.

Ces deux informations sont complémentaires : un comptage à l'aide d'une échelle, pendant une période choisie, permet d'obtenir une valeur moyenne de la masse volumique de la suspension à l'aide d'une courbe d'étalonnage. Si des variations brusques de la masse volumique se produisent, l'échelle de comptage ne permet pas de le savoir, par contre l'information analogique fournie par l'enregistreur rend compte des variations de la masse volumique de la suspension et permet de pondérer les résultats obtenus par le comptage.

ANNEXE III

Matériel d'essai.

- Figure A1 - Réservoir d'expédition et dispositif d'introduction des particules dans le circuit de transport.

- Figure A2 - Tuyère sonique pour la mesure du débit de gaz q_g.

- Figure A3 - Détail d'une prise de pression statique sur le conduit de transport.

- Figure A4 - Détail d'un capillaire sur les manomètres en U.

- Figure A5 - Exemples de lignes piezométriques relevées le long du conduit vertical à différentes valeurs q et vitesses U_g pour des essais avec des granulés de polyéthylène.

- Figure A6 - Détail du dispositif d'introduction des particules teintées (sous forme de grain) dans le conduit de transport vertical.

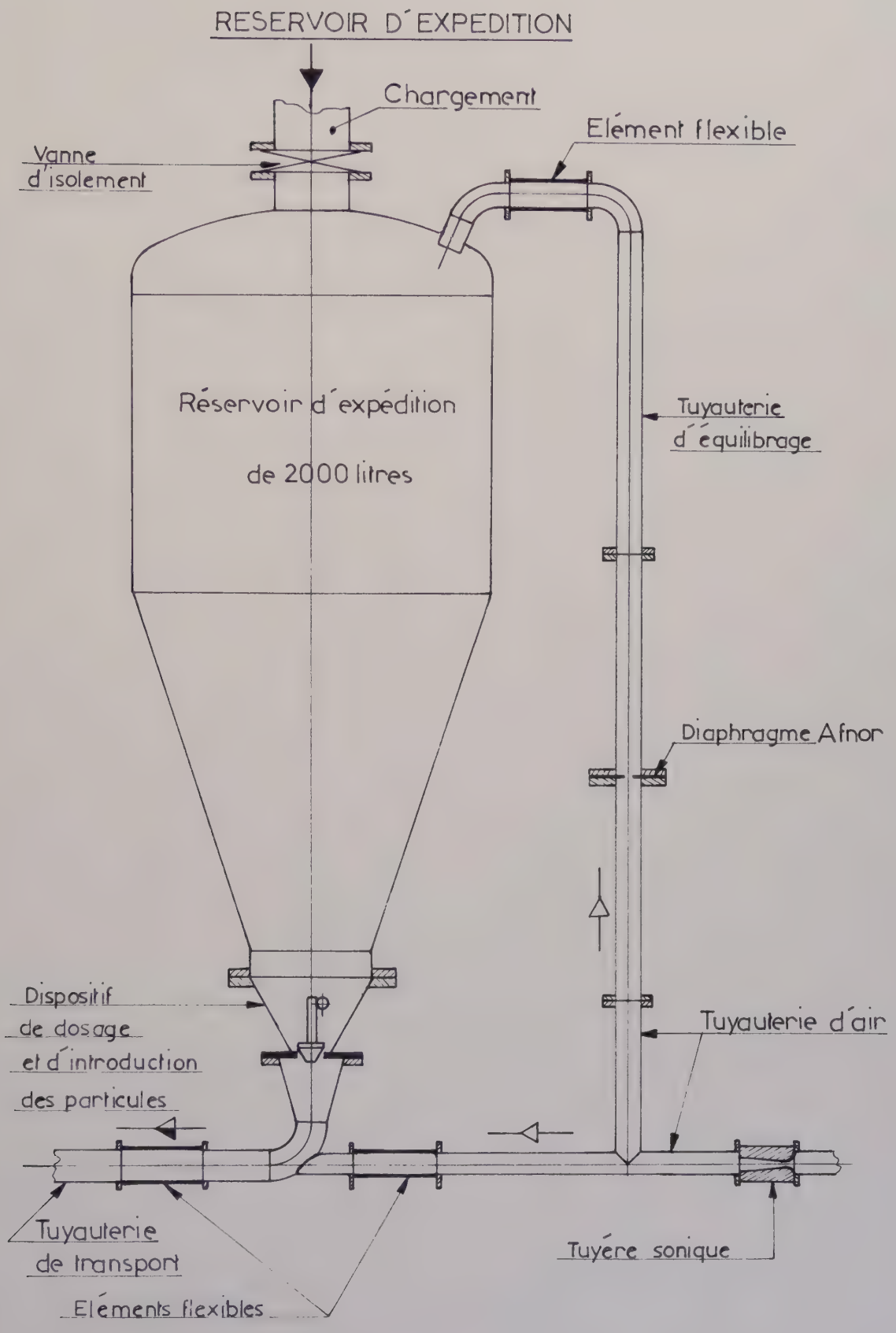
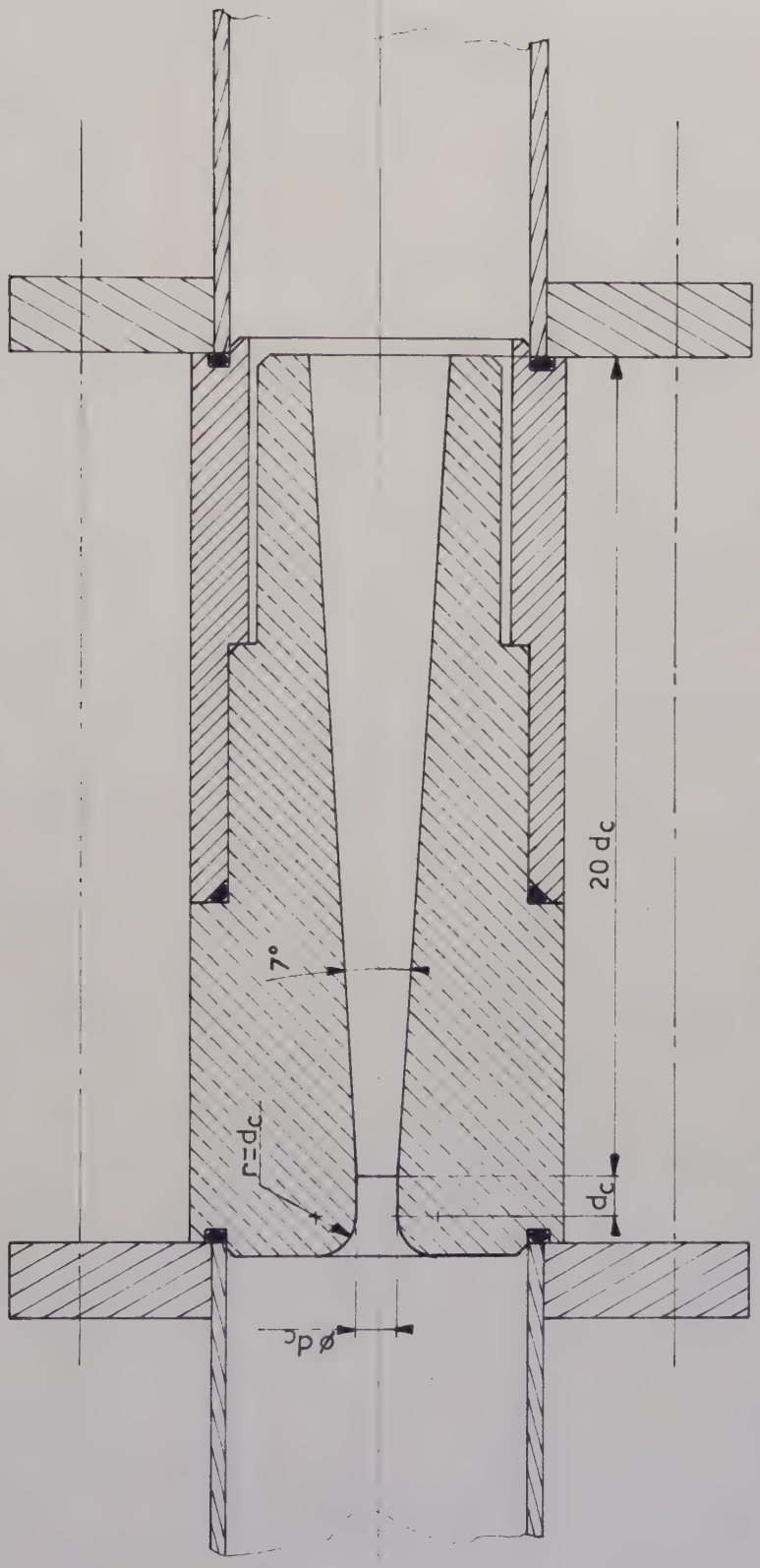

RESERVOIR D'EXPEDITION
Chargement
Elément flexible
Vanne d'isolement
Réservoir d'expédition de 2000 litres
Tuyauterie d'équilibrage
Diaphragme Afnor
Dispositif de dosage et d'introduction des particules
Tuyauterie d'air
Tuyauterie de transport
Eléments flexibles
Tuyère sonique

Figure A1

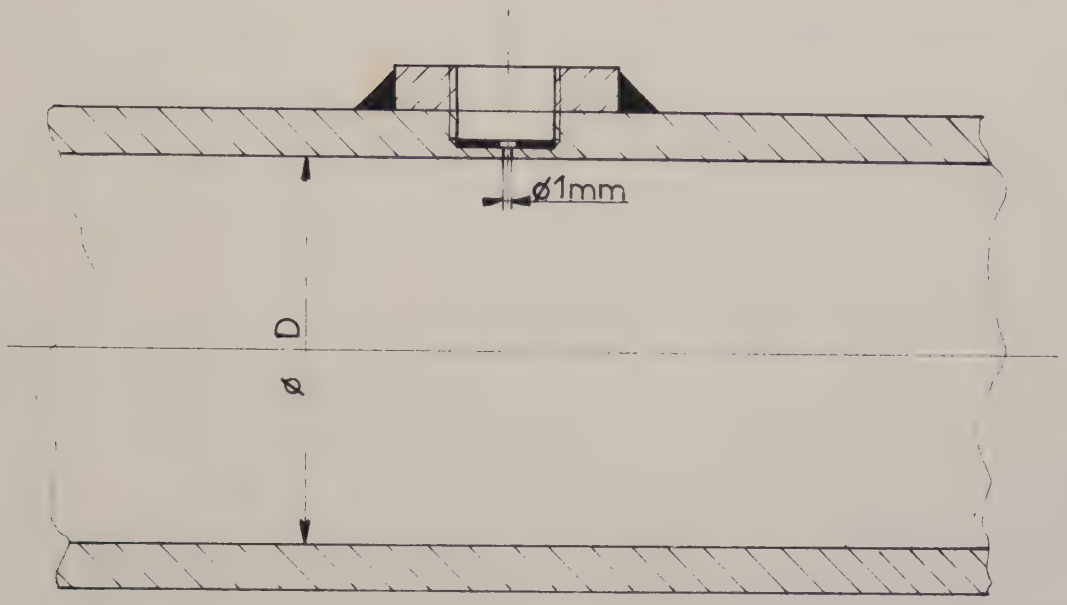
Figure A2

TUYERE SONIQUE



PRISE DE PRESSION STATIQUE

Figure A3



MANOMETRE EN U AVEC CAPILLAIRE

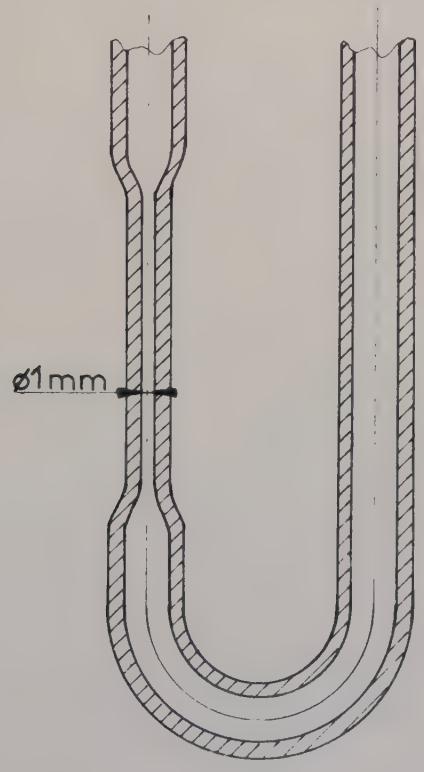
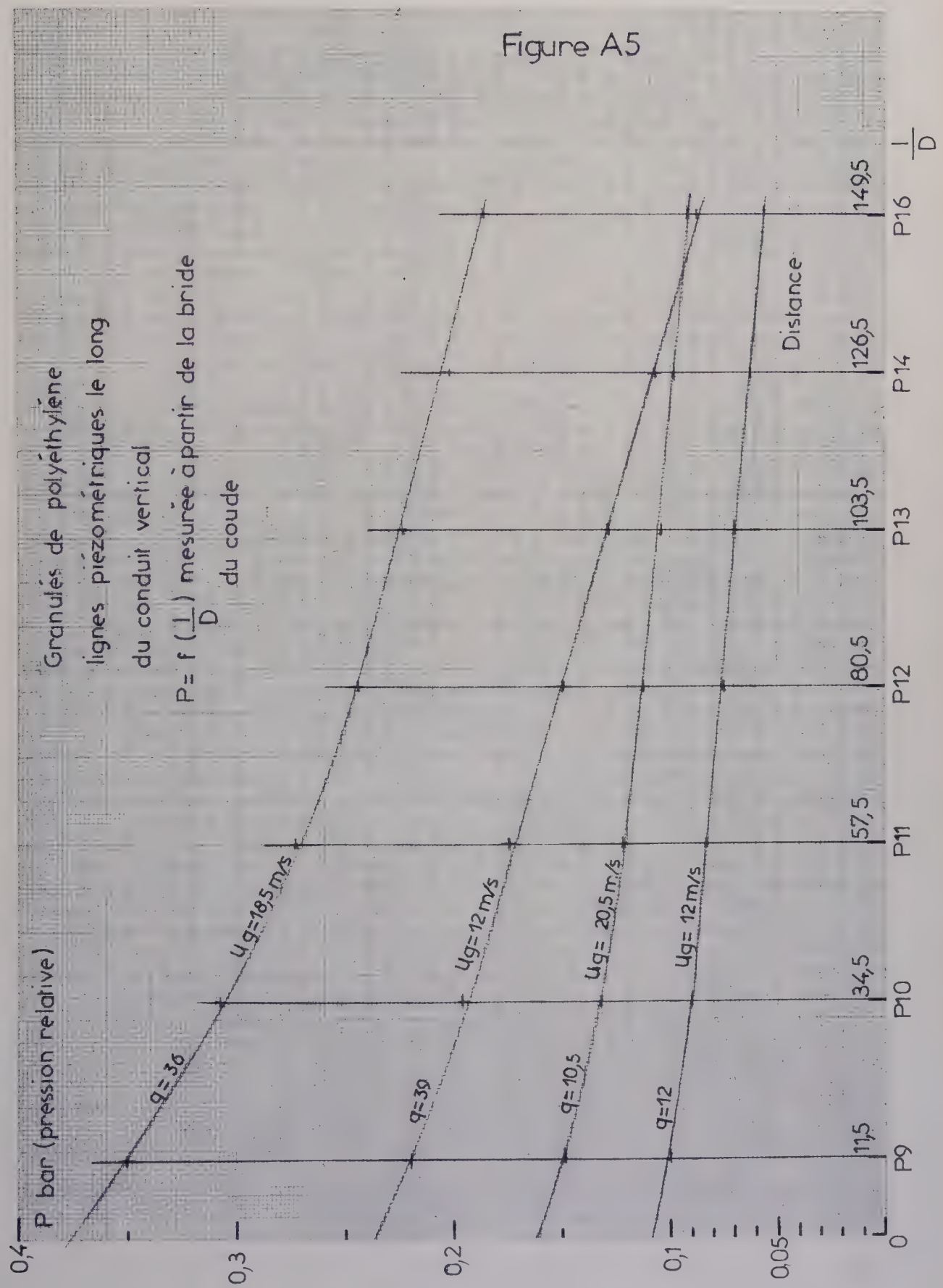


Figure A4

Figure A5


Granulés de polyéthylène
lignes piézométriques le long
du conduit vertical
P = f (1/D) mesurée à partir de la bride
du coude
P bar (pression relative)
0,4
0,3
0,2
0,1
0,05
0
Ug=18,5 m/s
Ug=12 m/s
Ug= 20,5 m/s
Ug= 12 m/s
q=36
q=39
q=10,5
q=12
P9
P10
P11
P12
P13
P14
P16
11,5
34,5
57,5
80,5
103,5
126,5
149,5
Distance
1/D

DISPOSITIF D'INTRODUCTION
DES PARTICULES TEINTEES

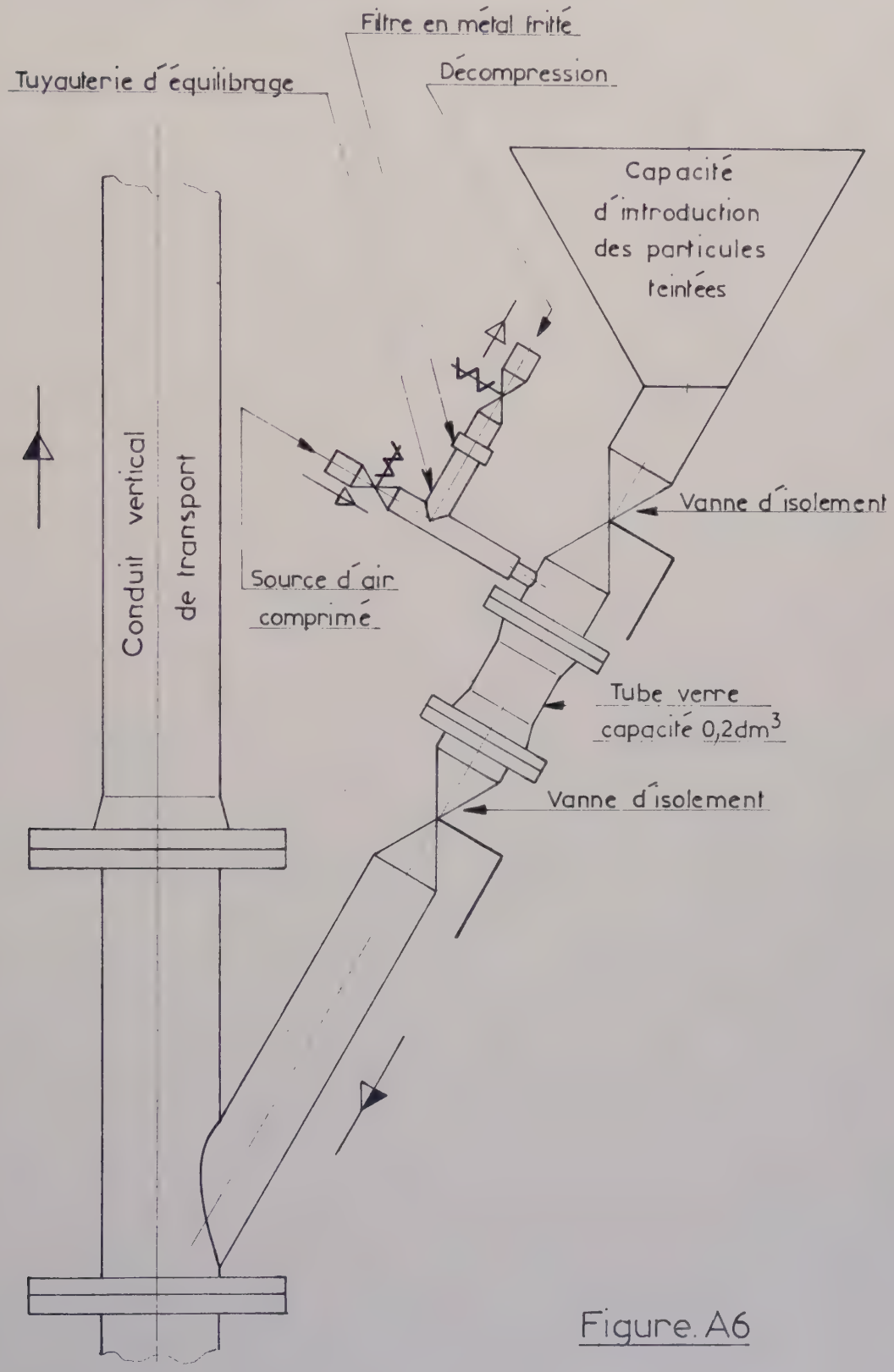


Figure. A6

ANNEXE IV

GRANULOMETRIES DES PRODUITS TRANSPORTES.

Produits granuleux

Pour les produits granuleux on a déterminé le diamètre moyen équivalent des particules en considérant le diamètre de la sphère ayant même volume.

- granulés de polyéthylène :
  forme cylindrique - diamètre moyen = 3,478 mm
  hauteur moyenne = 2,64 mm.
  . diamètre moyen équivalent d = 3,64 mm
  . masse volumique ρ_s = 0,958 g/cm^3
- blé : forme allongée : longueur moyenne : 6,6 mm
  petit diamètre : 2,94 mm
  grand diamètre : 3,456 mm
  . diamètre moyen équivalent d = 4,06 mm
  . masse volumique ρ_s = 1,27 g/cm^3

Produits pulvérulents

- Sable

  Compte tenu de la quantité importante de sable dont on disposait il a été procédé périodiquement au changement du lot de matière servant aux essais.

  On trouvera sur la figure A7 l'analyse granulométrique effectuée au tamis A.F.A.

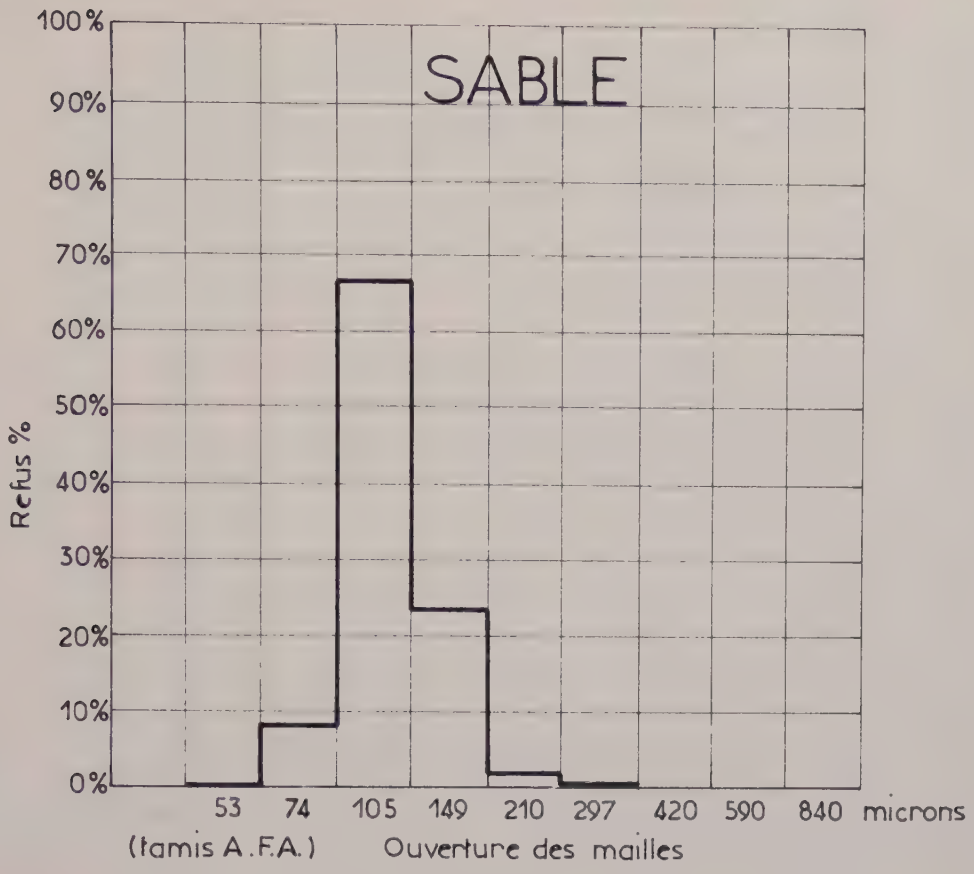
  . diamètre moyen des particules d = 0,105 mm
  . masse volumique ρ_s = 2,58 g/cm^3

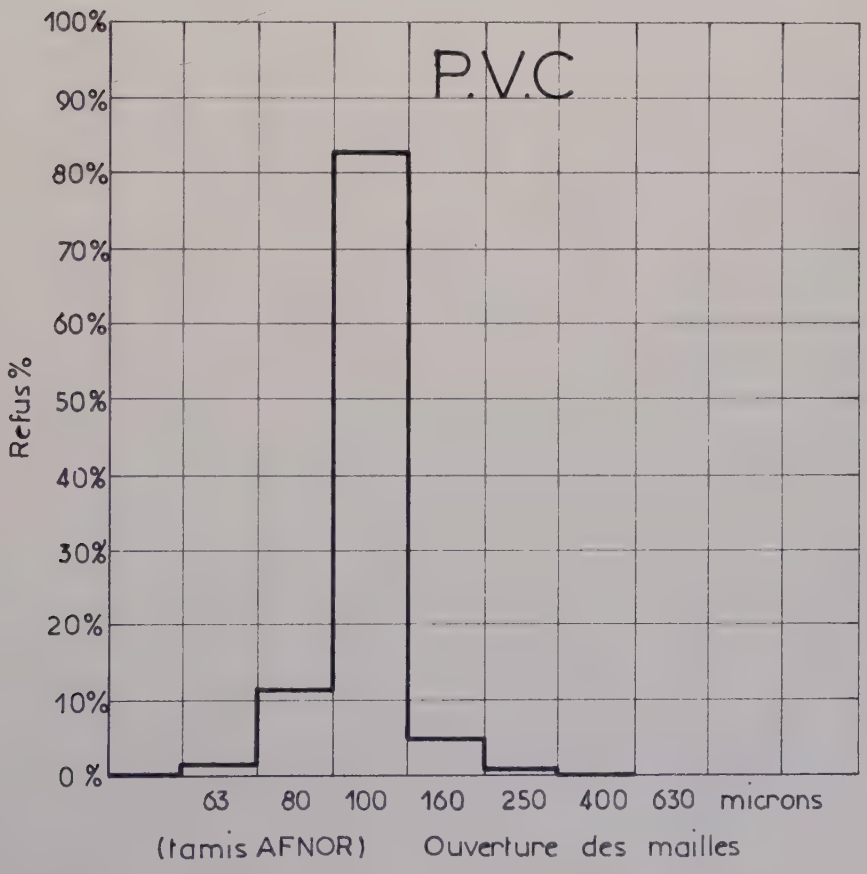
- PVC en poudre

  L'analyse granulométrique a été effectuée au tamis AFNOR sur un échantillon prélevé après plusieurs passages du produit dans l'installation afin que les très fines particules soient éliminées.
  Les résultats sont reportés sur la figure A7
  . diamètre moyen des particules d = 0,100 mm
  . masse volumique ρ_s = 1,4 g/cm^3.

Figure A7

COURBES GRANULOMETRIQUES DES PRODUITS PULVERULENTS





ANNEXE V

Résultats des essais aux très fortes concentrations massiques. Ces essais n'ont pas été retenus pour les dépouillements, étant donné les grandes fluctuations de pression enregistrées.

Matière : PVC en poudre. $\rho_s = 1{,}4$ g/cm^3, d = 0,100 mm

D_{mm}	P1 bar	P2 bar	q_s kg/s	q_g Kg/s	$q = \frac{q_s}{q_g}$
80	3,1	2,2	9,25	0,064	144,6
	3,5	2,4	9,778	0,0726	134,6
	5	2,95	10,694	0,0991	107,9
	5	2,86	10,083	0,1019	99
	5,8	3,18	10,833	0,1146	94,6
	5,8	3,12	10,417	0,1165	89,5
	1,5	0,85	3,708	0,0505	73,4
	1,75	0,9	3,875	0,0556	69,7
	2	1,03	4,014	0,0608	66,1
50	2,5	1,67	3,722	0,0285	130,5
	2	1,5	3,228	0,0249	129,8
	2	1,37	3,011	0,0257	117
	1,75	1,2	2,778	0,0238	116,5
	3,5	2	4,167	0,0285	113
	3	1,7	3,506	0,0342	102,4
	3	1,55	3,125	0,0353	88,6
	3	1,33	2,792	0,0368	75,8
32	3,5	2,8	1,542	0,0159	97,1
	2	1,6	1,042	0,0116	89,5
	5	3,47	1,828	0,0210	87,2
	5	3,4	1,681	0,0216	77,7

P1 = pression relative en amont de la tuyère sonique

P2 = pression relative en aval de la tuyère.